

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МИХАЛЕВСЬКИЙ ДМИТРО ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.391.8

ДИСЕРТАЦІЯ

**Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і
характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж**

05.12.02 - Телекомунікаційні системи та мережі
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____/ Д.В. Михалевський/
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант –
Кичак Василь Мартинович,
д.т.н., професор

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради

/М.І. Бешлей /

Вінниця – 2021

АНОТАЦІЯ

Михалевський Д.В. Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Вінницький національний технічний університет, Національний університет “Львівська політехніка” МОН України, Вінниця, 2021.

На сьогодні, обмеження частотного та енергетичного ресурсів призводить до погіршення параметрів та характеристик радіоканалів, особливо це стосується корпоративних телекомунікаційних мереж на основі радіодоступу 5G і Wi-Fi, які розгортаються в умовах приміщень. Це сприяє появі затримок та помилок під час сеансів передачі трафіку, що приводить до інформаційних втрат. В загальному, це є значною проблемою, яка виникає при проектуванні та експлуатації корпоративних мереж, на основі технологій радіодоступу 5G/Wi-Fi із-за виникнення ряду зовнішніх і внутрішніх негативних факторів. Саме тому, для досягнення максимально можливих технічних показників корпоративних телекомунікаційних мереж є важливим завданням дослідження радіоканалів в реальних умовах та розроблення методів і моделей оцінювання їх параметрів і характеристик.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми розроблення методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів із врахуванням максимально-можливої кількості різноманітних факторів впливу на основі статистичних зв'язків між ними з метою підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації.

У роботі розв'язується **протиріччя** між потребою підвищення швидкості передавання інформації для покращення якості надання інфокомунікаційних

послуг та необхідністю адаптивної оптимізації мережі для зменшення інформаційних втрат на основі методів оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу і існування внутрішніх та зовнішніх факторів впливу в приміщеннях.

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовані мета та завдання досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами та програмами, вказана новизна та практична цінність отриманих результатів, відзначений особистий внесок автора, наведені дані про апробацію та практичне впровадження, публікації та структуру роботи.

В **першому** розділі проведено аналіз сучасного стану теорії та практики оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi та розглянуто проблематику їх впровадження. Встановлено, що розгортання мереж у приміщеннях створює ряд проблем які таких як: обмеження енергетичного та спектрального ресурсів, вплив інтерференційних завад (сусідні мережі, mesh-мережі, піко- і нанокомірки 4G/5G), вплив параметрів приміщень та внутрішніх об'єктів (архітектурні перешкоди та багатопронепроменеве поширення хвиль), електромагнітна сумісність, існування статичних та випадкових факторів впливу, розмір інвестицій та ін. Також, проведено аналіз експериментальних досліджень параметрів радіоканалу та встановлено випадковий характер часових характеристик параметрів радіоканалів та їх залежність від різного роду факторів впливу, що передбачає значну складність процедури оцінювання. На основі цього було встановлено, що використання класичних підходів до оцінювання дають низьку інформативність і є потреба в створенні універсальної системи оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів із врахуванням максимально-можливої кількості факторів впливу та врахуванням параметрів корпоративних приміщень, що робить актуальним розроблення механізму отримання оптимальних технічних показників для досягнення максимально-можливої пропускної здатності та стабільності радіоканалів у мережах 5G/Wi-Fi.

В другому розділі запропоновано метод просторового оцінювання потужності сигналу на вході приймача із врахуванням процесів поширення сигналів та внутрішніх і зовнішніх факторів впливу в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi. Особливістю методу є моделі із врахуванням параметрів приміщення та положення точки доступу. Моделі призначені для оцінювання потужності сигналу на вході приймача для частотних діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц та враховують геометричні розміри приміщення, кутове і центральне положення точки доступу та інтервал флуктуацій. Це дає змогу визначати рівень сигналу безпосередньо у просторі приміщення та його залежність від статичних і випадкових факторів впливу. На основі експериментальних досліджень, отримано коефіцієнти просторових розподілів потужності сигналу на вході приймача. Встановлено рівні флуктуацій для ділянок підсилення та послаблення сигналу. Отримала подальшого розвитку загальна математична модель радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж, яка враховує зв'язок основних параметрів із зовнішніми та внутрішніми факторами впливу, а також дію багатопроменевого поширення хвиль у приміщеннях, що залежить від кількості поверхонь, інтерференційні завад та шумів.

Третій розділ присвячено дослідженню теоретичним та практичним аспектам визначення інформаційних параметрів радіоканалів на основі пропускної здатності та ефективної швидкості передачі інформації та врахування дії різного роду факторів впливу. Для цього, вдосконалено математичну модель радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на основі коефіцієнту ефективності передачі інформації, яка дає змогу, оцінювати вплив різного роду технологій та активність абонентів на кількість корисної інформації враховуючи специфікації стандартів. Для визначення впливу різного роду архітектурних перешкод на процеси передавання даних в межах приміщень запропоновано інтегральні показники інформаційної ефективності радіоканалів на основі проведення експериментальних досліджень та використання регресійних моделей. Розроблено метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у

радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, який, на відміну від відомих, базується на поєднанні методів моніторингу та статистичного аналізу із використанням програмно-апаратних засобів спеціалізованих або абонентських приймальних пристроїв, що дало змогу покращити результативність управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах радіодоступу

У **четвертому** розділі на базі функціонального зв'язку між основними параметрами радіоканалу проведено теоретико-експериментальні дослідження статистичного зв'язку. Розроблено метод оцінювання гарантованої пропускну здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку, який, на відміну від відомих, використовує статистичний зв'язок між параметрами радіоканалу, що дало змогу збільшити швидкодію обробки результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування. Основою методу є моделі оцінювання, які використовують потужність сигналу на вході приймача і його флуктуації, як основний інформативний параметр, а також існування додаткових флуктуацій біля стін приміщення. Наведено приклади оцінювання гарантованої пропускну здатності для мультимедійного трафіку.

У **п'ятому** розділі отримано та проаналізовано результати експериментальних досліджень дії факторів впливу на параметри радіоканалів в умовах корпоративних приміщень. На основі цього запропоновано узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах, на основі еталонних моделей середньостатистичних значень в межах покриття мереж радіодоступу, що дають можливість оцінювати дію факторів впливу на основні параметри радіоканалів, як окремо так і комплексно. Отримано рекомендації для оцінювання параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж в умовах корпоративних приміщень, що дає змогу виявляти особливості поширення сигналів у приміщеннях, сеансів передачі кадрів та роботу радіоканалів в умовах існування різного роду факторів впливу. Досліджено вплив інтерференційних завад, архітектурних перешкод, ефекту багатопробеневого поширення хвиль,

виробничо-експлуатаційних відхилень параметрів приймальних пристроїв, розміру пакетів, мобільності абонентів, несиметричності випромінювання та роумінгу на параметри і характеристики радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Шостий розділ присвячено розробленню методології оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів та практичних рекомендацій для покращення технічних показників корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi. Для цього розроблено логіко-аналітичний інструмент процесу оцінювання, визначено достовірність вимірювання засобів моніторингу, достовірність розроблених методів та адекватність отриманих у роботі моделей, а також виконано експериментальні дослідження практичної реалізації на основі структури корпоративної телекомунікаційної мережі. На основі обробки експериментальних результатів досліджень радіоканалів у корпоративних приміщеннях, запропоновано стохастичну модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій. Така модель використовує співвідношення взаємозв'язку статистичної імовірності, дисперсії та інтервалу флуктуацій, а також статистичний зв'язок між флуктуаціями основних параметрів радіоканалу, що дає можливість значно пришвидшити отримання кінцевого результату оцінювання, оскільки за один цикл оцінювання можна отримати інформацію про технічні параметри радіоканалу та наближений результат інтервалів флуктуацій. Визначено ефективність оцінювання запропонованої методології на основі кількісних та якісних показників, використовуючи порівняння результатів для існуючих та розроблених моделей для експериментальних досліджень корпоративної телекомунікаційної мережі радіодоступу Wi-Fi.

Ключові слова: радіоканал, корпоративна телекомунікаційна мережа, потужність сигналу, пропускна здатність каналу, ефективна швидкість передачі інформації, параметри та характеристики, 5G, Wi-Fi.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, де відображені результати дисертації

1. Михалевський Д.В. Дослідження параметрів каналного та фізичного рівнів мереж стандарту 802.11. *Информационно-коммуникационные технологии в управлении : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2015. Гл. 6. С. 133–152.

2. Михалевський Д.В. Особливості каналного та фізичного рівнів технології МІМО для стандарту 802.11. *Наука и инновации в современном мире: техника и технологии : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2017. Кн. 2, гл. 8. С. 125–136.

3. Михалевський Д.В. Дослідження параметрів каналного та фізичного рівнів мереж стандарту 802.11n. *Научные ответы на вызовы современности: техника и технологии : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2016. Кн. 2, гл. 3. С. 52-76.

4. Mykhalevskiy D.V. Study of channel and physical levels parameters of 802.11ac standard. *The potential of modern science. Vol 3: [coll.] monograph*. London: SCIEEMCEE, 2019. Pp. 186–211. (British library catalogue).

5. D.V. Mykhalevskiy. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2019, № 1. Pp. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004. (Журнал індексується Scopus, Web of Science та ще 39 баз).

6. D.V. Mykhalevskiy, V.M. Kychak (2019), “Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard”, *Latvian journal of physics and technical sciences*, №2, Pp. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0009. (Журнал індексується Scopus, Web of Science та ще 39 баз).

7. D.V. Mykhalevskiy, O.S. Horodetska. Investigation of wireless channels according to the standard 802.11 in the frequency range of 5 GHz for two subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERE)*, № 42(2), pp. 50–57. 2019. Doi: 10.26480/jmerd.02.2019.50.57. (Журнал індексується Scopus, Open Access).

8. D.V. Mykhalevskiy. Method for estimating the effective data rate in 802.11 channel with using monitoring algorithm. *Journal of Applied Research and Technology*, № 18(3), 2020, Pp. 119-128. DOI: 10.22201/icat.24486736e. 2020.18.3.1089 (Журнал індексується Scopus, Open Access).

9. D. Mykhalevskiy. Development of a spartial method for the estimation of signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, № 4/9 (88). Pp. 29–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106925. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

10. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the input to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. № 6/9 (96). P. 16–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983 (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

11. D. Mykhalevskiy, N. Vasylykivskiy, O. Horodetska. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 4/9 (88), pp. 38–43. 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

12. D. Mykhalevskiy. Development of the method of evaluation of effective data rate on the basis of empirical model of statistical relationship of basic parameters for the wireless channel 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 5/9 (107), pp. 26–35. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

13. D. Mykhalevskiy. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 6/9 (108), pp. 18–24. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218720. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

14. Михалевський Д.В. Розробка математичних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації у просторі приміщень для безпроводних каналів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2020, № 1. С. 110–115. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-110-115> (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

15. Михалевський Д.В. Дослідження факторів впливу на оцінювання основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2020, № 6. С. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-153-6-107-114> (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

16. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Оцінка достовірності алгоритмів моніторингу для абонентських пристроїв стандарту 802.11. *Вісник ХНУ*. 2020. №6. С. 151-155. DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-151-155.

17. Михалевський Д. В. Технічна діагностика безпроводних каналів стандарту 802.11. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. № 2. С. 111–120. Doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-2-111-120. Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

18. Михалевський Д.В. Розробка моделі оцінювання основних параметрів безпроводного каналу стандарту 802.11 з урахуванням дестабілізуючих факторів. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. № 1. С. 59–67 Doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-1-59-67. Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

19. Михалевський Д.В. Оцінка адекватності моделей регресії в оцінюванні основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2020. Том 31 (70). №6. Частина 1. С. 16–20. DOI: 10.32838/TNU-2663-5941/2020.6/03 (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

20. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Розробка моделі оцінювання впливу архітектурних перешкод на основні параметри безпроводного каналу стандарту 802.11. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2020. Том 31 (70). №3. Частина 1. С. 48–53. (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

21. Михалевський Д.В. Розробка моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для каналів стандарту 802.11 на основі квадратичної функції. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2020. Том 31 (70) № 4, 2020. С. 25–29. (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

22. Михалевський Д.В. Оцінка параметрів безпроводного каналу передачі інформації стандарту 802.11 Wi-Fi. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2014, № 6/9 (72). С. 22-25. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31666. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

23. Михалевський Д.В., Гузь М.Д., Красота Р.О. Дослідження впливу довжини пакетів верхніх рівнів на ефективну швидкість передачі для стандарту Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2014, №4. С. 189-192.

24. Михалевський Д.В., Гузь М.Д. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2015, №1. С. 195-199. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

25. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка якості мультимедійного трафіку під час перемикання між точками доступу у мережах Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2014, №3. С. 151-155. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

26. Михалевський Д.В., Мондьяк В.Є., Красота Р.О. The research of wi-fi channel for multimedia traffic. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2014, №2. С. 175-178. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

27. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Система передачі високоякісних звукових сигналів без втрат. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2013, №3. С. 153-156. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

28. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка параметрів відео зображення в телекомунікаційних системах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2013, №1. С. 201-205. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

29. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при перемиканні між точками доступу. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 3(36), Т. 6, 2014. С.56–59. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

30. Михалевський Д.В., Гузь М.Д., Красота Р.О. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 4(37), Т. 5, 2014. С.13–16. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

31. Михалевський Д.В., Гузь М.Д. Оцінка розподілу потужності сигналу передавача стандарту 802.11 у приміщенні. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 1(38), Т. 3, 2015. С.48–52. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

32. Михалевський Д.В., Номировська В.В., Постернак О.М. Оцінка розподілу потужності сигналу для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 2(39), Т. 4, 2015. С.32–35. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

33. Михалевський Д.В., Номировська В.В., Постернак О.М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного та сусіднього інтерференційного

каналів для стандарту 802.11n. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №2, 2015. С. 155-159. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

34. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 3(40), Т. 3, 2015. С.43–47. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

35. Михалевський Д.В. Аналіз побудови пакетів та кадрів під час передачі інформації безпроводним каналом стандарту 802.11. *Научные труды SWorld*, Вып. 1(42), Т. 4, 2016. С. 76–82. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

36. Михалевський Д.В., Крутінь А.В., Рогозіна Л.А. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11n частотного діапазону 5 ГГц. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №2, 2016. С. 214–218. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

37. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Особливості технології MIMO у стандарті 802.11. *Научные труды SWorld*, Вып. 3(44), Т. 1, 2016. С. 49–54. DOI:10.21893/2410-6720-2016-44-1-106. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

38. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №3, 2016. С. 172–176. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

39. Михалевський Д.В., Арсенюк Д.І., Жмурко І.С. Керуючий операційний елемент у стандарті 802.11. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 46, Т. 1. 2017. С. 27–32. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-46.1.105. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

40. Михалевський Д.В. Дослідження розподілу потужності сигналу в умовах багатопроменевого поширення хвиль для стандарту 802.11. *Сборник научных*

трудов Sword, Вып. 47, Т. 1. 2017. С. 30–34. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-47.1.091. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

41. Михалевський Д.В. Дослідження впливу чутливості приймачів стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №3, 2017. С. 176–180. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

42. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. *Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing*. Conference Proceeding. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine, P. 369-372.

43. Михалевський Д.В. Оцінка критерію якості для безпроводного каналу стандарту 802.11. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2015)*. Тези доповідей. 25-27 листопада 2015 р., м. Дніпропетровськ. С. 110-111.

44. Михалевський Д.В. Просторовий розподіл сигналу у приміщенні при центральному розміщенні точки доступу стандарту 802.11. *Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТ-2017)*. Матеріали VI міжнар. наук.-техн. Конференції. 28-30 червня 2017 р., Вінниця, ВНТУ. С. 40-41.

45. Михалевський Д.В. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11ac. *Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях*. Матеріали VI міжнар. наук.-техн. Конференції. 9-11 листопада 2017 р., Чернівці, ЧНУ ім Ю. Федьковича, 2017. С. 31.

46. Михалевський Д.В. Дослідження просторового розподілу сигналу у приміщенні для стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції. 8-13 червня 2017 р., Одеса–Хмельницький, ОНАЗ ім. О.С. Попова–ХНУ, 2017. С. 188–189.

47. Михалевський Д.В. Оцінка об'єму інформації для однонаправленого режиму передачі кадру у стандарті 802.11. Математика. *Інформаційні технології. Освіта*. Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції. 5-7 червня 2016 р., Луцьк-Світязь. 2016. С. 90-91.

48. Михалевський Д.В. Дослідження розподілу потужності сигналу в умовах багатопробеневого поширення хвиль для стандарту 802.11. *Modern methods, innovation, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference*. Radom, Republic of Poland. December 27-28, 2017. С.47–50 .

49. Михалевський Д.В. Модель оцінки ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням параметрів моніторингу. *Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)"*. 14-16 листопада 2019 р., Вінниця, ВНТУ, 2019. С. 28–29.

50. Михалевський Д.В. Розподіл потужності сигналу у приміщенні для кутового розміщення точки доступу стандарту 802.11 в діапазоні 5 ГГц. *Матеріали XIV міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)"*, 15-17 жовтня 2018 р. Вінниця, ВНТУ, 2018. С.1.

51. Михалевський Д.В., Шаталюк В.О., Куць В.Й. Особливості технології мімо у стандарті 802.11ac. *Матеріали XVI міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-16-2016)»*, 10-15 червня 2016 р, Одеса, 2016. С. 204.

52. Михалевський Д.В. Особливості моделювання безпроводного каналу стандарту Wi-Fi. *Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки*. IV МНПК. 23-25 жовтня 2014 р., Чернівці, 2014. С. 90.

53. Михалевський Д.В. Гузь М.Д., Красота Р.О. Аналіз мультимедійного трафіку для концепції цифрового будинку. *Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ – 2014»*: 10-та ММНТК. 12-17 травня 2014 р., Севастополь, 2014. С. 96.

54. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Технологія МІМО для передачі звуку високої якості без втрат. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства. XX МНПК студентів,аспірантів,та молодих учених.* Квітень 2013р., Кременчук, 2013.

55. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Передача високоякісних звукових сигналів без втрат. *Матеріали XII міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-12-2013).* Червень 2013р., Одеса, 2013.

56. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка параметрів передачі високоякісних звукових сигналів. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2013.* Жовтень 2013р., Вінниця ВНТУ, 2013. Ст. 40.

57. Михалевський Д.В., Красота Р.О., Гузь М.Д. Особливості передачі мультимедійного трафіку в безпроводних мережах. *Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи».* 10 – 16 березня 2014 р., Київ, 2014. С. 169-170.

58. Михалевський Д.В., Бойко М.В. Використання технології тімо для мережі цифрового будинку. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства. XXI МНПК студентів,аспірантів,та молодих учених.* Квітень 2014р., Кременчук, 2014. С. 70-71.

59. Михалевський Д.В., Мондяк В.Є., Красота Р.О. Дослідження wi-fi каналу для передачі мультимедійного трафіку. *Матеріали XIII міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-13-2014).* Червень 2014р., Одеса, 2014. С. 214.

60. Михалевський Д.В. Аналіз параметрів сигналу у каналах стандарту 802.11g при спектральних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "MSATPA"* Oct. 20-22, 2014, Dubai. С. 33-37.

61. Михалевський Д.В. Дослідження потужності сигналу приймачів сигналу WI-FI. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "TPMSPS"*. Sep. 22-24, 2014, Dubai. С. 29-31.

62. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка рівня сигналу від положення антен у просторі . *Матеріали XII Міжн. Конф. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)*. 14-16 жовтня 2014 р., ВНТУ, Вінниця.

63. Михалевський Д.В. Дослідження впливу довжини пакетів на параметри безпровідного каналу. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "The Goal of the World Science 2015"*, January 24-25, 2015, Dubai, UAE, 2015, P. 6-13.

64. Михалевський Д.В. Аналіз сигналу у каналах стандарту 802.11 при інтерференційних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Science and Education – Our Future"*, November 24-26, 2014, Abu Dhabi, UAE, P. 13-17.

65. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на пропускну здатність каналу 802.11. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Innovative technologies in science"*, February 21-22, 2015, Dubai, UAE). Vol. 1, P. 71-78.

66. Михалевський Д.В. Дослідження впливу інтерференційних каналних завад у мережах 802.11n. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Scientific and Practical Results in 2014"*, Desember 22-24, 2014, Dubai, UAE, Vol. 1, 2014, P. 33-36.

67. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на пропускну здатність каналу стандарту 802.11 ч.2. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Methodology of modern reseach"*, March 21-22, 2015, Dubai, UAE, Vol. 1, 2015. P. 56-61.

68. Михалевський Д.В. Номировська В.В., Постернак О.М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного каналу для стандарту 802.11n. *Матеріали XIV міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-14-2015)*, червень 2015 р, м. Одеса, с.253.

69. Михалевський Д.В. Аналіз частотного спектру діапазону 5 ГГц для сімейства стандартів 802.11x. *Proceedings of the International Scientific and*

Practical Conference «The Top Actual Researches in Modern Science, July 18-19, 2015, Ajman, UAE, Vol. I, P. 9-12.

70. Михалевський Д.В. Дослідження чутливості приймачів стандарту 802.11. *International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions. September 24-25, 2015, Dubai, UAE, 2(2), Vol.1, P. 87-92.*

71. Михалевський Д.В. Поняття діагностики у мережах стандарту 802.11. *International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application. October 20-21, 2015, Dubai, UAE, 3(3), Vol.1, P. 20-21.*

72. Михалевський Д.В. Наугольних Є.С. Аналіз критеріїв ефективності безпроводних мереж. *Матеріали XIV міжнародної НТК «Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-15-2015), вересень 2015р. Одеса. С. 80-81.*

73. Михалевський Д.В., Рогозіна Л.А., Крутінь А.В., Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для каналу стандарту 802.11n у діапазоні 5ГГц. *International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” (Innovative Technologies in Science.) February 25 – 26, 2016, Dubai, UAE, 2(6), Vol.1, pp. 66-69.*

74. Михалевський Д.В. Дослідження режиму multicast у стандарті 802.11. *International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” (Methodology of Modern Research). March 28 – 29, 2016, Dubai, UAE, 4(8), Vol.1. P. 54-56.*

75. Михалевський Д.В. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11ac. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем (MEICS-2017): Матеріали II Всеукраїнська. наук.-техн. конференції. 22-14 листопада 2017 р. Дніпро, ДНУ ім. О. Гончара, с. 70.*

Патенти України на корисну модель:

76. Михалевський Д.В. Максимчук Ю.А. Пристрій для прийому сигналів ір телебачення, із подальшим їх відображенням: патент №75146 України на корисну модель. № u2012 048; заявка 18.04.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл. №22. 4 с.

77. Михалевський Д.В. Тіщенко І.Б. Янковчук Д.О. Пристрій для аналізу частотних каналів мереж стандарту wi-fi: патент № 102699 України на корисну модель. № u2015 05419; заявка, 02.06.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 4 с.

78. Михалевський Д.В. Тіщенко І.Б. Янковчук Д.О. Пристрій для оцінки параметрів якості відеозображення: патент № 102698 України на корисну модель. № u2015 05418; 02.06.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 4 с.

ABSTRACT

Mykhalevskiy D. V. Methodology for improving the efficiency of estimating the parameters and characteristics of radio channels of corporate telecommunications networks. – Qualifying scientific work as manuscript.

Thesis for a scientific degree of Doctor of Engineering in the specialty 05.12.02 «Telecommunication systems and networks» (172 – Telecommunications and radio engineering). – Vinnitsa National Technical University, Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Vinnitsa, 2021.

Today, the limitation of frequency and energy resources leads to the deterioration of the parameters and characteristics of radio channels, especially for corporate telecommunications networks based on 5G radio access and Wi-Fi, which are deployed indoors. This contributes to delays and errors during traffic transfer sessions, leading to information loss. In general, this is a significant problem that arises in the design and operation of corporate networks, based on 5G / Wi-Fi radio access technologies due to a number of external and internal negative factors. That is why, in order to achieve the maximum possible technical indicators of corporate telecommunication networks, it is an important task to study radio channels in real conditions and to develop methods and models for evaluating their parameters and characteristics.

This thesis is concerned with addressing the urgent applied-science challenge of developing a methodology for estimating radio channel basic parameters and characteristics corporate telecommunications networks considering influencing factors based on of statistical links between them in order to improve the technical efficiency of corporate telecommunication networks at the design and optimization stages.

The purpose of this thesis is to resolve conflict between the need for increase in the data-transfer rate for improving the quality of information and communication services and the necessity for adaptive optimization of the network to reduce data loss through methods for estimating the radio channel parameters and characteristics in an environment of the limited radio-frequency resource and the influence of internal and external factors on the premises.

The **introduction** gives a general description of the work, substantiates the relevance of the research topic, formulates the purpose and objectives of research, reveals the relationship of work with scientific plans and programs, indicates the novelty and practical value of the results, noted the author's personal contribution, data on testing and implementation, publications and work structure.

The first chapter analyzes the current state of theory and practice of assessing the parameters and characteristics of radio channels of corporate telecommunications networks 5G / Wi-Fi and discusses the problems of their implementation. It is established that the deployment of networks in the premises creates a number of problems such as: limitation of energy and spectral resources, the impact of interference (adjacent networks, mesh networks, pico and nanocells 4G / 5G), the impact of parameters of premises and internal objects (architectural interference and multi-beam propagation), electromagnetic compatibility, the existence of static and random factors, the size of investment, etc. Also, the analysis of experimental researches of radio channel parameters is carried out and the random character of time characteristics of radio channel parameters and their dependence on various influence factors is established, which provides considerable complexity of the evaluation procedure. Based on this, it was found that the use of classical approaches to evaluation give low information and there is a need to create a universal system for evaluating the parameters and characteristics of radio channels, taking into account the maximum possible number of factors and taking into account the parameters of corporate premises. to achieve the highest possible bandwidth and stability of radio channels in 5G / Wi-Fi networks.

The second chapter proposes a method of spatial estimation of signal power at the input of the receiver, taking into account the processes of signal propagation and internal and external factors in the radio channels of corporate telecommunications networks 5G / Wi-Fi. The peculiarity of the method is the model taking into account the parameters of the room and the position of the access point. The models are designed to estimate the signal strength at the receiver input for the 2.4 GHz and 5 GHz frequency bands and take into account the geometric dimensions of the room, the angular and

central position of the access point and the fluctuation interval. This allows you to determine the signal level directly in the space of the room and its dependence on static and random factors. Based on experimental studies, the coefficients of spatial power distribution of the signal at the receiver input are obtained. Fluctuation levels for signal amplification and attenuation areas have been established. The general mathematical model of radio channels of telecommunication corporate networks has been further developed, which takes into account the connection of basic parameters with external and internal factors of influence, as well as the action of multibeam wave propagation in rooms, depending on the number of surfaces, interference and noise.

The third chapter is devoted to the study of theoretical and practical aspects of determining the information parameters of radio channels based on bandwidth and effective speed of information transmission and taking into account the action of various factors of influence. To this end, the mathematical model of radio channels of corporate telecommunications networks has been improved on the basis of the coefficient of information transmission efficiency, which allows to assess the impact of various technologies and subscriber activity on the amount of useful information taking into account specifications. To determine the impact of various architectural barriers on data transmission processes within the premises, integrated indicators of information efficiency of radio channels based on experimental studies and the use of regression models are proposed. A method for determining the effective speed of information transmission in the radio channels of corporate telecommunications networks, which, in contrast to the known, is based on a combination of monitoring and statistical analysis using software and hardware of specialized or subscriber receivers, which allowed to improve resource management in software. configured radio access networks

In **the fourth chapter**, on the basis of the functional connection between the main parameters of the radio channel, theoretical and experimental studies of statistical connection are carried out. A method for estimating the guaranteed bandwidth of radio channels of corporate telecommunications networks for the transmission of different types of traffic has been developed, which, unlike the known ones, uses statistical correlation between radio channel parameters, which allowed to increase the processing

speed during initial network optimization. The method is based on estimation models that use the signal strength at the receiver input and its fluctuations as the main informative parameter, as well as the existence of additional fluctuations near the walls of the room. Examples of estimating guaranteed bandwidth for multimedia traffic are given.

In **the fifth chapter**, the results of experimental studies of the effect of factors influencing the parameters of radio channels in corporate premises are obtained and analyzed. Based on this, generalized integrated indicators of influencing factors in radio channels are proposed, based on reference models of average values within the coverage of radio access networks, which allow to assess the effect of influencing factors on the main parameters of radio channels, both individually and comprehensively. Recommendations for estimating the parameters of radio channels of corporate telecommunication networks in the conditions of corporate premises are received, which allows to reveal the peculiarities of signal propagation in premises, transmission sessions and operation of radio channels in the presence of various influencing factors. The influence of interference interference, architectural obstacles, the effect of multi-beam wave propagation, production and operational deviations of receiving device parameters, packet size, subscriber mobility, radiation asymmetry, asymmetry and roaming asymmetry on parameters and characteristics of corporate telecommunication networks is studied.

The sixth chapter is devoted to the development of a methodology for assessing the parameters and characteristics of radio channels and practical recommendations for improving the technical performance of corporate telecommunications networks 5G / Wi-Fi. For this purpose, a logical-analytical tool of the evaluation process was developed, the reliability of measurement of monitoring tools, the reliability of developed methods and the adequacy of the obtained models, as well as experimental studies of practical implementation based on the structure of corporate telecommunications network. Based on the processing of experimental results of research of radio channels in corporate premises, a stochastic model of fluctuations of the main parameters of radio channels based on the scattering interval of regression

models is proposed. This model uses the relationship between the statistical probability, variance and interval of fluctuations, as well as the statistical relationship between the fluctuations of the main parameters of the radio channel, which significantly accelerates the final evaluation result, because one evaluation cycle can obtain information about technical parameters approximate result of fluctuation intervals. The efficiency of evaluation of the proposed methodology on the basis of quantitative and qualitative indicators is determined, using the comparison of results for existing and developed models for experimental researches of the corporate telecommunication network of radio access Wi-Fi.

Keywords: radio channel, corporate telecommunication network, signal power, channel bandwidth, effective data rate, parameters and characteristics, 5G, Wi-Fi.

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

1. Mykhalevskiy D.V. Research of parameters of channel and physical levels of networks of the 802.11 standard. Information and communication technologies in management: [coll.] Monograph. Odessa: Kuprienko SV, 2015. Ch. 6. P. 133–152.

2. Mykhalevskiy D.V. Features of channel and physical levels of MIMO technology for the 802.11 standard. Science and innovation in the modern world: technology and technologies: [coll.] Monograph. Odessa: Kuprienko SV, 2017. Book 2, Ch. 8. P. 125–136.

3. Mykhalevskiy D.V. Research of parameters of channel and physical levels of networks of the 802.11n standard. Scientific answers to the challenges of modernity: technique and technology: [coll.] Monograph. Odessa: Kuprienko SV, 2016. Book 2. Ch. 3. P. 52-76.

4. Mykhalevskiy D.V. Study of channel and physical levels parameters of 802.11ac standard. The potential of modern science. Vol 3 : [coll.] monograph. London: SCIEEMCEE, 2019. Pp. 186–211. (British library catalogue).

5. D.V. Mykhalevskiy. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2019, № 1.

Pp. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004. (Printed scientific periodical, indexed Scopus, Web of Science and other).

6. D.V. Mykhalevskiy, V.M. Kychak. Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard. *Latvian journal of physics and technical sciences*, №2, Pp. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0009. (Printed scientific periodical, indexed Scopus, Web of Science and other).

7. D.V. Mykhalevskiy, O.S. Horodetska. Investigation of wireless channels according to the standard 802.11 in the frequency range of 5 GHz for two subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERRD)*, № 42(2), pp. 50–57. 2019. Doi: 10.26480/jmerd.02.2019.50.57. (Printed scientific periodical, indexed Scopus, Open Access).

8. D.V. Mykhalevskiy. Method for estimating the effective data rate in 802.11 channel with using monitoring algorithm. *Journal of Applied Research and Technology*, № 18(3), 2020, Pp. 119-128. DOI: 10.22201/icat.24486736e.2020.18.3.1089 (Printed scientific periodical, indexed Scopus, Open Access).

9. D. Mykhalevskiy. Development of a spartial method for the estimation of signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, № 4/9 (88). Pp. 29–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106925. (Printed scientific periodical, cat. A, indexed Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

10. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the input to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. № 6/9 (96). P. 16–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983 (Printed scientific periodical, cat. A, indexed Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

11. D. Mykhalevskiy, N. Vasylykivskiy, O. Horodetska. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 4/9 (88), pp. 38–43. 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191. (Printed scientific periodical, cat. A, indexed Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

12. D. Mykhalevskiy. Development of the method of evaluation of effective data rate on the basis of empirical model of statistical relationship of basic parameters for the wireless channel 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 5/9 (107), pp. 26–35. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191. (Printed scientific periodical, cat. A, indexed Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

13. D. Mykhalevskiy. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 6/9 (108), pp. 18–24. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218720. (Printed scientific periodical, cat. A, indexed Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

14. Mykhalevskiy D. V. Development of Mathematical Models for Assessing the Effective Speed of Information Transmission in Space Rooms for a Wireless Channel of 802.11 Standard. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*. 2020. № 1. P. 110–115. DOI: 10.31649/1997-9266-2020-148-1-110-115 (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

15. Mykhalevskiy D. V. Investigation of Factors of Influence on Evaluation of Main Parameters of Wireless Channels of 802.11 Standard. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*. 2020. № 6. P. 107–114. DOI: 10.31649/1997-9266-2020-153-6-107-114 (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

16. Mykhalevskiy D., Horodetska O. Assessment of reliability of monitoring algorithms for subscriber devices 802.11 standard. *Herald of Khmelnytsky National University: Technical Sciences*. 2020. №6. P. 151-155. DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-151-155. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

17. Mikhalevsky D. Technical diagnostics of wireless channels of the 802.11 standard. *Proceedings of the O.S. Popov ONAT*. 2020. № 2. P. 111–120. Doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-2-111-120. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

18. Mykhalevskiy D. Development of the model of evaluation of the basic parameters of the wireless channel of 802.11 standard, taking into account the destabilizing factors. *Proceedings of the O.S. Popov ONAT*. 2020. № 1. P. 59–67 Doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-1-59-67. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

19. Mykhalevskiy D. Assessment of adequacy of regression models in evaluation of main parameters of wireless channels of standard 802.11. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University series «Technical Sciences»*. 2020. Vol. 31 (70). №6. Part 1. P. 16–20. DOI: 10.32838/TNU-2663-5941/2020.6/03 (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

20. Mykhalevskiy D., Horodetska O. Development of a model for assessing the impact of architectural obstacles on the basic parameters of the wireless channel of 802.11 standard. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University series «Technical Sciences»*. 2020. Vol. 31 (70). №3. Part 1. P. 48–53. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

21. Mykhalevskiy D. Development of a model for assessing the effective data rate for channels of standard 802.11 basis on a quadratic function. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University series «Technical Sciences»*. 2020. Vol. 31 (70) № 4, 2020. P. 25–29. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

22. Mykhalevskiy D. Evaluation wireless settings information channel of 802.11 wi-fi standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, № 6/9 (72). P. 22-25. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31666. (Printed scientific periodical, cat. B, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus and other).

23. Mykhalevskiy D., Guz M., Krasota R. Study the influence of length of the packages of the highest level on effective speed transmission on wi-fi networks. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, 2014, №4. P. 189-192. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

24. Mykhalevskiy D., Guz M. Investigation of influence of the subscribers movement on effective data transfer speed in wi-fi networks. *Measuring and Computing*

Devices in Technological Processes, 2015, №1. P. 195-199. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

25. Mykhalevskiy D.V., Naugol'nykh E.S., Melnik V.M. Quality estimation of the multimedia traffic while switching between access points in wi-fi networks. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, 2014, №3. P. 151-155. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

26. Mykhalevskiy D., Mondlak B.E., Krasota R. The research of wi-fi channel for multimedia traffic. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, 2014, №2. P. 175-178. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

27. Mykhalevskiy D.V., Naugol'nykh E.S., Melnik V.M. System for transmitting high quality audio signal without losing. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, 2013, №3. P. 153-156. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

28. Mykhalevskiy D.V., Naugol'nykh E.S., Melnik V.M. Evaluation of video image parameters in telecommunication systems. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, 2013, №1. P. 201-205. (Printed scientific periodical, cat. B, indexed Index Copernicus, Google scholar).

Mykhalevskiy D.V., Naugol'nykh E.S., Melnik V.M. Transfer of traffic in the wi-fi networks when switching between access points. *Scientific papers Sworld*. Iss. 3(36), Vol. 6, 2014. P. 56–59. (indexed Index Copernicus, Google scholar).

29. Mykhalevskiy D., Guz M., Krasota R. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад. *Scientific papers Sworld*, Iss. 4(37), Vol. 5, 2014. P. 13–16. (indexed Index Copernicus, Google scholar).

30. Mykhalevskiy D., Guz M. Оцінка розподілу потужності сигналу передавача стандарту 802.11 у приміщенні. *Scientific papers Sworld*. Iss. 1(38), Vol. 3, 2015. P. 48–52. (indexed Index Copernicus, Google scholar).

31. Michalevskiy D., Nomyrovska V., Posternak A. Evaluation distribution of signal strength for group 802.11x standards in 2.4 GHz band. *Scientific papers Sworld*. Iss. 2(39), Vol. 4, 2015. P. 32–35. (indexed Index Copernicus, Google scholar).

32. Michalevskiy D.V., Nomyrovska V.V., Posternak A.N. Research transmission of information in condition of combined and the adjacent interference channels for 802.11n standard. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, №2, 2015. P. 155-159. (indexed Index Copernicus, Google scholar).
33. Mykhalevskiy D., Horodetska O. Evaluation effective data transfer rate for group 802.11X standards in 2.4 GHz band. *Scientific papers Sworld*. Iss. 3(40), Vol. 3, 2015. P. 43–47. (indexed Index Copernicus, Google scholar).
34. Mykhalevskiy D.V. Analysis of structure packets and frames during transfer information of wireless channel 802.11 standard. *Scientific papers Sworld*. Iss. 1(42), Vol. 4, 2016. P. 76–82. (indexed Index Copernicus, Google scholar).
35. Mikhalevskiy D., Rohozina L., Krutin A. Investigation of the wireless channel of 802.11N standard for the frequency range of 5 GHz. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. №2, 2016. P. 214–218. (indexed Index Copernicus, Google scholar).
36. Mykhalevskiy D., Horodetska O. Features of MIMO technology in 802.11 standard. *Scientific papers Sworld*, Iss. 3(44), Vol. 1, 2016. P. 49–54. DOI:10.21893/2410-6720-2016-44-1-106. (indexed Index Copernicus, Google scholar).
37. Mykhalevskiy D.V. Investigation of influence of the subscribers movement on effective data transfer speed in wi-fi networks. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. №3, 2016. P. 172–176. (indexed Index Copernicus, Google scholar).
38. Mykhalevskiy D.V., Arsenyuk D.I, Zhmurko I.S. Manegment operations element in 802.11 standard. *Scientific papers Sworld*, Iss. 46, Vol. 1. 2017. P. 27–32. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-46.1.105. (indexed Index Copernicus, Google scholar).
39. Mykhalevskiy D.V. Research signal power distribution for the conditions multipath waves of 802.11 standard. *Scientific papers Sworld*, Iss. 47, Vol. 1. 2017. P. 30–34. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-47.1.091. (indexed Index Copernicus, Google scholar).

40. Mykhalevskiy D.V. Study of the effect of the recognize of the receivers of the of the 802.11 standard. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. №3. 2017. P. 176–180. (indexed Index Copernicus, Google scholar).

Proceedings that certify an improvement of thesis materials:

41. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. *Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing*. Conference Proceeding. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine, P. 369-372.

42. Mykhalevskiy D.V. Evaluation of the quality criteria for the 802.11 wireless channel. *Proceeding of the Promising areas of modern electronics, information and computer systems (MEICS-2015)*. Nov. 25-27, 2015. Dnipropetrovsk. P. 110-111.

43. Mykhalevskiy D.V. Spatial distribution of the signal in the room with the central location of the access point of the 802.11 standard. *Proceeding of the VI STC Modern problems of radio electronics, telecommunications and instrument making (MPRTT-2017)*. July 28-30, 2017. Vinnitsa, VNTU. P. 40-41.

44. Mykhalevskiy D.V. Study of the wireless channel of the 802.11as standard. *Practical application of nonlinear dynamic systems in infocommunications. Materials VI International. scientific and technical conference*. Nov. 9-11, 2017, Chernivtsi, Yu. Fedkovych National University, 2017. P. 31.

45. Mykhalevskiy D.V. Study of the spatial distribution of the signal in the room for the 802.11 standard. *Proceedings of the XVII International SPC «Measuring and Computing Devices in Technological Processes» (MCDTP-2017)*, June 8-13, 2017. Odessa, 2017. P. 188–189.

46. Mykhalevskiy D.V. Estimation of the amount of information for unidirectional frame transfer mode in the 802.11 standard. *Mathematics. Information Technology. Education. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. July 5-7, 2016, Lutsk-Svityaz. 2016. P. 90-91.

47. Mykhalevskiy D.V. Investigation of signal power distribution in the conditions of multibeam wave propagation for the 802.11 standard. *Modern methods, innovation, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference*. Radom, Republic of Poland. December 27-28, 2017. C.47–50 .

48. Mykhalevskiy D.V. Model for estimating the effective speed of information transfer taking into account monitoring parameters. *Proceedings of the I International Scientific and Technical Conference "Modern problems of infocommunications, radio electronics and nanosystems (MPSREN-2019)»*. Nov. 14-16, 2019. Vinnitsa, VNTU, 2019. P. 28–29.

49. Mykhalevskiy D.V. Distribution of signal power in the room for angular placement of the access point of the 802.11 standard in the range of 5 GHz. *Proceedings of the XIV International Conference "Control and Management in Complex Systems (CMCS-2018)"*, Oct. 15-17, 2018. Vinnitsa, VNTU, 2018. P.1.

50. Mykhalevskiy D.V., Shataluk V.O., Kuts V.Y. Features of technology by in the 802.11as standard. *Proceedings of the XVI International SPC «Measuring and Computing Devices in Technological Processes» (MCDTP-16-2016)*, June 10-15, 2016, Odessa, 2016. P. 204.

51. Mykhalevskiy D.V. Features of modeling of the wireless channel of the Wi-Fi standard. *Physical and technological problems of radio devices, telecommunications, nano- and microelectronics. IV ISPC*. Oct. 23-25, 2014, Chernivtsi, 2014. P. 90.

52. Mykhalevskiy D.V., Guz M., Krasota R. Multimedia traffic analysis for digital home concept. *Modern problems of radio engineering and telecommunications "RT - 2014": 10th ISPC*. May 12-17, 2014, Sevastopol, 2014. P. 96.

53. Mykhalevskiy D.V., Naugol'nykh E.S., Melnik V.M. MIMO technology for high-quality lossless sound transmission. *Actual problems of society. XX ISPC*. Apr. 2013. Kremenchug, 2013.

54. Mykhalevskiy D.V., Naugol'nykh E.S., Melnik V.M. Transmission of high-quality sound signals without losses. *Proceedings of the XII International SPC «Measuring and Computing Devices in Technological Processes» (MCDTP-12-2013)*. June 2013., Odessa, 2013.

55. Mykhalevskiy D.V., Naugol'nykh E.S., Melnik V.M. Estimation of parameters of transmission of high-quality sound signals. *Measurement, control and diagnostics in technical systems of MCDTS-2013*. Oct. 2013, Vinnitsa VNTU, 2013. P. 40.

56. Mykhalevskiy D.V., Guz M., Krasota R. Features of multimedia traffic transmission in wireless networks. *International scientific and technical conference "Radio fields, signals, devices and systems"*. Mar. 10-16, 2014, Kiev, 2014. P. 169-170.

57. Mykhalevskiy D.V., Boyko M.V. Using mimo technology for a digital home network. *Actual problems of society. XXI ISPC*. Apr. 2014. Kremenchug, 2014. P. 70-71.

58. Mykhalevskiy D.V., Mondlak V.E., Krasota R. Research of wi-fi channel for multimedia traffic transmission. *Proceedings of the XIII International SPC «Measuring and Computing Devices in Technological Processes» (MCDTP-13-2014)*, June 2014., Odessa, 2014. P. 214.

60. Mykhalevskiy D.V. Analysis of signal parameters in 802.11g channels under spectral interference. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "MSATPA"* Oct. 20-22, 2014, Dubai. C. 33-37.

61. Mykhalevskiy D.V. Investigation of the signal strength of WI-FI signal receivers. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "TPMSPS"*. Sep. 22-24, 2014, Dubai. C. 29-31.

62. Mykhalevskiy D.V., Naugol'nykh E.S., Melnik V.M. Estimation of a signal level from position of antennas in space. *Proceedings of the XII International Conference "Control and Management in Complex Systems (CMCS-2014)"*. Oct. 14-16, 2014, Vinnitsa, VNTU.

63. Mykhalevskiy D.V. Investigation of the influence of packet length on the parameters of the wireless channel. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "The Goal of the World Science 2015"*, January 24-25, 2015, Dubai, UAE, 2015, Pp. 6-13

64. Mykhalevskiy D.V. Signal analysis in 802.11 channels with interference interference. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Science and Education – Our Future"*, November 24-26, 2014, Abu Dhabi, UAE, 13-17 pp.

65. Mykhalevskiy D.V. Study of the impact of subscriber traffic on the bandwidth of the 802.11 channel. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Innovative technologies in science"*, February 21-22, 2015, Dubai, UAE). Vol. 1, 71-78 pp.

66. Mykhalevskiy D.V. Investigation of the influence of interference channel interference in 802.11n networks. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Scientific and Practical Results in 2014"*, Desember 22-24, 2014, Dubai, UAE, Vol. 1, 2014, 33-36 pp.

67. Mykhalevskiy D.V. Study of the influence of subscribers' movement on the bandwidth of the 802.11 channel. P.2. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Methodology of modern reseach"*, March 21-22, 2015, Dubai, UAE, Vol. 1, 2015, 56-61 pp.

68. Mykhalevskiy D.V. Nomyrovska V.V., Posternak A.N. Preliminary information transfer in the head of the summarized channel for the 802.11n standard. *Proceedings of the XIV International SPC «Measuring and Computing Devices in Technological Processes» (MCDTP-15-2015)*. June, 2015. Odessa, 2015. P. 214.

69. Mykhalevskiy D.V. Analysis of the 5 GHz frequency spectrum for a family of 802.11x standards. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «The Top Actual Researches in Modern Science*, July 18-19, 2015, Ajman, UAE, Vol. I, P. 9-12.

70. Mykhalevskiy D.V. Preceding the sensitivity of accepting the 802.11 standard. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions. September 24-25, 2015, Dubai, UAE, 2(2), Vol.1, pp. 87-92.*

71. Mykhalevskiy D.V. Understanding diagnostics for 802.11 fences. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application. October 20-21, 2015, Dubai, UAE, 3(3), Vol.1, pp. 20-21.*

72. Mykhalevskiy D.V. Naugol'nykh E. S. Analysis of criteria for the effectiveness of wireless networks. *Proceedings of the XIV International SPC «Measuring and Computing Devices in Technological Processes» (MCDTP-15-2015), Sep. 2015. Odessa, P. 80-81.*

73. Mykhalevskiy D.V., Rohozina L., Krutin A. Estimation of the effective data rate for the 802.11n channel in the 5 GHz band. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Innovative Technologies in Science). February 25 – 26, 2016, Dubai, UAE, 2(6), Vol.1, pp. 66-69.*

74. Mykhalevskiy D.V. Study of multicast mode in the 802.11 standard. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Methodology of Modern Research. March 28 – 29, 2016, Dubai, UAE, 4(8), Vol.1, pp. 54-56.*

75. Mykhalevskiy D.V. Research of the wireless channel of the 802.11ac standard. *Promising areas of modern electronics, information and computer systems (MEICS-2017) : Proceedings of the All-Ukrainian scientific and technical conference. Nov. 22-14, 2017, Dnipro, DNU named O. Gonchar. P. 70.*

Proceedings where additional scientific results of thesis were published:

Patents of Ukraine for utility model:

76. Mykhalevskiy D. V., Maksimchuk Y. A. Device for receiving ip television signals, with their subsequent display. Patent 75146 UA, IPC (2012). Declared 18.04.2012; № u2012 048; Published 26.11.2012, Bulletin 22. 4 p.

77. Mykhalevskiy D. V., Tishchenko I. B., Yankovchuk D. O. Device for analysis of frequency channels of wi-fi networks. Patent 102699. IPC (2015). Declared 02.06.2015; № u2015 05419; Published 10.11.2015, Bulletin 21. 4 p.

78. Mykhalevskiy D. V., Tishchenko I. B., Yankovchuk D. O. Device for evaluating video quality parameters. Patent 102698. IPC (2012). Declared 02.06.2015; № u2015 05418; Published 10.11.2015, Bulletin 21. 4 p.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	38
ВСТУП.....	40
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОКАНАЛІВ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМІНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 5G/Wi-Fi	51
1.1 Аналіз основних параметрів і характеристик радіоканалів	51
1.2 Аналіз методів оцінювання енергетичних параметрів радіоканалів.....	66
1.3 Аналіз методів оцінювання інформаційних параметрів радіоканалів.....	71
1.4 Проблематика досліджень та постановка завдань оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів	79
Висновки до 1-го розділу	98
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТІ СИГНАЛУ У ДІАПАЗОНАХ 2,4 ГГЦ І 5 ГГЦ ДЛЯ МЕРЕЖ 5G/Wi-Fi	100
2.1 Застосування моделі вільного простору для оцінювання енергетичних параметрів радіоканалу	100
2.2 Оцінювання потужності сигналу на вході приймача для діапазону 2,4 ГГц...111	
2.3 Оцінювання потужності сигналу на вході приймача для діапазону 5 ГГц.....124	
2.4 Розроблення методу просторового оцінювання потужності сигналу на вході приймача	130
Висновки до розділу 2.....	139
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ТА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ У РАДІОКАНАЛАХ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	142
3.1 Розроблення узагальненої математичної моделі радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж	142

3.2 Оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для одного активного радіоканалу у мережі.....	155
3.3 Оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для двох активних радіоканалів у мережі.....	169
3.4 Розроблення методу визначення ефективної швидкості передачі інформації в радіоканалі	179
Висновки до розділу 3.....	193
РОЗДІЛ 4. МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ГАРАНТОВАНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ РАДІОКАНАЛІВ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	
	196
4.1 Дослідження загальної математичної моделі взаємозв'язку основних параметрів радіоканалу.....	196
4.2 Оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на базі статистичного зв'язку у просторі приміщень	202
4.3 Розроблення методу оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж	213
Висновки до розділу 4.....	229
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ У РАДІОКАНАЛАХ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	
	232
5.1 Розроблення узагальнених інтегральних показників факторів впливу у радіоканалах	232
5.2 Дослідження впливу інтерференційних завад на параметри радіоканалу.....	237
5.3 Дослідження впливу архітектурних перешкод на параметри радіоканалу....	254
5.4 Дослідження впливу виробничо-експлуатаційних відхилень параметрів приймальних пристроїв на характеристики радіоканалу.....	267
5.5 Дослідження впливу зовнішніх факторів на параметри радіоканалу.....	282
Висновки до розділу 5.....	303

РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ.....	306
6.1 Розроблення логіко-аналітичного інструменту процесу оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів	306
6.2 Методика оцінювання достовірності розроблених методів та адекватності отриманих моделей.....	317
6.3 Розроблення стохастичної моделі флуктуацій основних параметрів радіоканалів	328
6.4 Практична реалізація основних положень методології на базі структури корпоративної телекомунікаційної мережі.....	338
Висновки до розділу 6.....	350
ВИСНОВКИ	352
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	356
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	389
ДОДАТОК Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів.....	394

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АП	–	абонентський пристрій
ТД	–	точка доступу
AMSDU	–	агрегований сервісний кадр
AMPDU	–	агрегований кадр мак протоколу
ACK	–	кадр підтвердження
CTS	–	функція дозволу відправлення кадру,
CSMA/CD	–	функції множинного доступу з прослуховуванням несучої і виявленням колізій
DSSS	–	метод прямої послідовності для розширення спектра
DU	–	пакет даних
HT	–	високопродуктивний режим роботи каналу
LLC	–	підрівень керування логічним з'єднанням
MAC	–	підрівень керування доступом до середовища
MCS	–	схема визначення індексу модуляції і кодування
MIMO	–	технологія просторового рознесення потоку даних між передавальними і приймальними антенами
MMPDU	–	керуючий кадр мак протоколу
MPDU	–	кадр мак протоколу
MRC	–	максимальне відношення сигнал/шум

- MSDU – сервісний пакет даних MAC підрівня
- MU-MIMO – технологія багатокористувацького просторового рознесення потоку даних між передавальними і приймальними антенами
- OFDM – метод мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів
- OFDMA – метод ортогонального мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів
- PLCP – підрівень узгодження фізичного рівня
- PMD – підрівень середовища передачі
- PPDU – пакет даних підрівня PLCP
- PSDU – сервісний пакет даних підрівня PLCP
- RSSI – рівень сигналу на вході приймача
- RTS – функція запиту на відправлення пакету
- SM – просторове мультиплексування
- SU-MIMO – технологія однокористувацького просторового рознесення потоку даних між передавальними і приймальними антенами
- TKIP – протокол цілісності тимчасового ключа
- Tx, Rx – функції передачі та прийому пакетів
- WEP – алгоритм забезпечення безпеки мережі
- WPA – технологія забезпечення безпечного доступу

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні тенденції процесу конвергенції мереж передбачають виникнення подібності в апаратно-програмних засобах, що приводить до створення глобальної мережі, яка займає верхні п'ять рівнів моделі OSI [1]. В результаті існує глобальне віртуальне середовище, в якому створюються велика кількість сервісів та інфокомунікаційних послуг, доступ до яких можна отримати за допомогою каналного та фізичного рівнів, зокрема, використовуючи сучасні технології радіодоступу 5G і Wi-Fi [2]. Але в такому випадку виникає наступна ситуація – для обслуговування абонентських пристроїв використовується обмежений частотний діапазон 1...6 ГГц, що передбачає обмеження фізичного ресурсу [3-4]. В результаті цього, постійно розробляються технології сумісного використання радіочастотного ресурсу, як для ліцензованих діапазонів, так і не ліцензійних, застосовуючи методи програмно-конфігурованого керування. Такий підхід дає змогу підвищити технічну ефективність (надійність, пропускну здатність, ефективна швидкість передачі інформації та ін.) корпоративних телекомунікаційних мереж шляхом оптимізації основних параметрів радіоканалів в умовах постійного покращення якості надання інфокомунікаційних послуг і необхідності підключення значної кількості пристроїв. Проте, сумісне використання радіочастотного ресурсу призводить до погіршення параметрів та характеристик радіоканалів, особливо це стосується корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi, які працюють в умовах приміщень. Суттєвим недоліком в таких мережах є виникнення ряду зовнішніх негативних факторів, які зменшують ефективність передавання інформації по радіоканалах. До таких факторів можна віднести: вплив інтерференційних завад від сусідніх мереж; вплив параметрів приміщень та внутрішніх об'єктів, що приводить до багатопроменевого поширення хвиль; електромагнітної сумісності; потреба розташування додаткових комірок та низьку ефективність для використання MIMO високих порядків; існування статичних та випадкових факторів впливу та ін. Це сприяє появі затримок та помилок під час сеансів

передачі трафіку, що приводить до інформаційних втрат. В загальному це є значною проблемою, яка виникає при проектуванні та експлуатації корпоративних мереж розгорнутих на основі технологій радіодоступу 5G/Wi-Fi із метою досягнення максимально можливої пропускної здатності та стабільності радіоканалів.

Таким чином, в умовах розгортання радіотехнологій доступу 5G/Wi-Fi у корпоративних телекомунікаційних мережах виникає **протиріччя** між потребою підвищення швидкості передавання інформації для покращення якості надання інфокомунікаційних послуг та необхідністю адаптивної оптимізації мережі для зменшення інформаційних втрат на основі методів оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу і існування внутрішніх та зовнішніх факторів впливу в приміщеннях.

Для вирішення такого протиріччя є необхідність детального вивчення, як апаратних рішень технологій радіодоступу 5G/Wi-Fi, так і процесів які виникають під час передавання даних по радіоканалах шляхом створення нової методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів для вдосконалення існуючих методів і моделей проектування та оптимізації телекомунікаційних мереж.

Аналіз існуючих наукових досліджень показує, що на теперішній час оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж є актуальним і набуло досить широкого поширення у роботах вітчизняних та закордонних вчених таких як Л.Н. Беркман, В.М. Шокало, В.О. Пелішок, А.В. Лемешко, А.І. Семенко, С.В. Гаркуша, Ł. Chruszczyk, K. Foster, I. Soldo, K. Malarić, P. Chapre, S. Kotsopoulos та ін. за напрямом досліджень та встановлення закономірностей основних енергетичних параметрів сигналу [5-49] та С.А. Нестеренко, В.М. Кичак, В.С. Лазебний, В.Л. Бурячок, Т.М. Наритник, К.М. Обельовська, А.Д. Potorac, А.В. Barbosa, М.О. Khan, К. Rathod та ін. за напрямом дослідження основних інформаційних параметрів радіоканалів [50-79]. Але в більшості випадків, існуючі роботи направлені на побудову теоретичних моделей безпроводних мереж та радіоканалів або на

виявлення певних видів факторів впливу із відсутністю універсального механізму зв'язку із основними параметрами радіоканалу, що робить їх малоприсадними для використання на практиці в процесі проектування та оптимізації телекомунікаційних корпоративних мереж. Іншим недоліком існуючих досліджень є сам процес оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів, який також супроводжується значною кількістю випадкових факторів, що впливають на період спостереження і достовірність.

Таким чином, враховуючи низький рівень випромінювання сучасних мереж радіодоступу 5G/Wi-Fi, існування значної кількості факторів впливу та складну картину поширення радіохвиль у приміщеннях виникає актуальна **науково-прикладна проблема** розроблення методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів із врахуванням максимально-можливої кількості різноманітних факторів впливу на основі статистичних зв'язків між ними з метою підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету, в межах низки держбюджетних науково-дослідних тем: «Розробка методів і пристроїв первинного цифрового оброблення високочастотних сигналів для систем радіоелектронної боротьби» (2016-2017 рр., № держреєстрації 0116U004710), «Методи та пристрої формування, оброблення й вимірювання сигналів радіоінформаційних систем промислових і військових об'єктів» (2017-2019 рр., № держреєстрації 0117U007139), «Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу» (2019-2021 рр., № держреєстрації 0119U000296), а також госпдоговірної кафедральної тематики «Методи та засоби вимірювання та оброблення сигналів в радіотехнічних та телекомунікаційних системах на базі інфокомунікаційних технологій» (2013-2018 рр.), № 45K1; «Методи та засоби обробки надвисокочастотних сигналів в телекомунікаційних та радіотехнічних системах» (2019-2023 рр.), № 45K1.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж шляхом розроблення нових методів та моделей оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів із врахуванням факторів впливу та статистичних зв'язків.

Для досягнення поставленої мети в межах дисертаційних досліджень були сформульовані та розв'язані такі завдання:

- аналіз сучасного стану теорії та практики оцінювання енергетичних та інформаційних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi;

- розроблення методу оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача із врахуванням процесів поширення сигналів та внутрішніх і зовнішніх факторів впливу у корпоративних приміщеннях;

- формалізація інтегральних показників ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації;

- розроблення методу визначення ефективної швидкості передачі інформації на основі поєднання методів моніторингу та статистичного аналізу;

- розроблення методу оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку;

- розроблення інтегральних показників факторів впливу у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж;

- розроблення теоретичних та експериментальних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації в умовах існування різного роду факторів впливу у корпоративних приміщеннях для прогнозування інформаційних втрат у радіоканалах;

- розроблення методології оцінювання основних параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж із врахуванням факторів впливу і статистичних зв'язків між ними;

- практична реалізація та оцінювання ефективності запропонованих методів та моделей на основі досліджень корпоративної телекомунікаційної мережі.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання параметрів інформаційних сигналів на базі програмно-апаратних засобів приймальних пристроїв.

Предмет дослідження: методи та моделі оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для зменшення інформаційних втрат.

Методи дослідження. В процесі теоретичних досліджень радіоканалів використано теорію радіозв'язку, теорію завадостійкості, кодування та інформації, теорію передачі та обробки даних, теорію цифрового радіозв'язку, методи аналізу на основі моделей затухання сигналу у вільному просторі. Для розроблення методів оцінювання використано теорію моніторингу та радіомоніторингу, теорію контролю, теорію випадкових процесів, основні положення теорії ймовірності. Для розроблення моделей оцінювання основних параметрів радіоканалу використано методи математичного і фізичного моделювання та експериментальних досліджень, методи математичної статистики, методи статистичної обробки результатів, теорію статистичного та кореляційного аналізу, методи лабораторного та натурного експериментів, методи регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропоновано метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача, який, на відміну від відомих, враховує процеси поширення сигналів та внутрішні і зовнішні фактори впливу в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для забезпечення неперервної оптимізації покриття мережі радіодоступу у приміщенні із мінімальними інформаційними втратами.

2. Розвинуто математичну модель процесу передавання інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, яка, на відміну від відомих, відрізняється узагальненим поєднанням технічних параметрів специфікацій стандартів, що у сукупності дає змогу оцінювати вплив різноманітних технологій та активність абонентів у мережі на кількість корисної інформації у радіоканалах.

3. Вперше формалізовано інтегральні показники ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації, які, на відміну від відомих, дають змогу прогнозувати інформаційні втрати в межах покриття мереж радіодоступу із врахуванням архітектурних перешкод у корпоративних приміщеннях.

4. Вперше розроблено метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, який, на відміну від відомих, базується на поєднанні методів моніторингу та статистичного аналізу із використанням програмно-апаратних засобів спеціалізованих або абонентських приймальних пристроїв, що дало змогу покращити результативність управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах радіодоступу.

5. Вперше запропоновано метод оцінювання гарантованої пропускну здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку, який, на відміну від відомих, використовує статистичний зв'язок між параметрами радіоканалу, що дало змогу збільшити швидкодію обробки результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування.

6. Вперше запропоновано узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах, на основі еталонних моделей середньостатистичних значень в межах покриття мереж радіодоступу, що дають можливість оцінювати дію факторів впливу на основні параметри радіоканалів, як окремо так і комплексно.

7. Набула подальшого розвитку стохастична модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій, яка, на відміну від відомих, використовує статистичну імовірність і дисперсію, що дає можливість значно спростити отримання кінцевого результату інтервалів флуктуацій на основі середньостатистичних результатів моделей оцінювання.

8. Вперше розроблено методологію оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, яка дає змогу підвищити ефективність досліджень, отримання нових знань про роботу радіоканалів в умовах приміщень і дію факторів впливу на їх параметри, що дає можливість

створення логіко-аналітичного інструменту для підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації.

Практичне значення одержаних результатів. Основним практичним результатом дисертації, який отриманий на базі проведених теоретичних та експериментальних досліджень, полягає у можливості їх застосування для покращення технічної ефективності існуючих корпоративних телекомунікаційних мереж побудованих на базі радіотехнологій 5G/Wi-Fi, а також для подальшого впровадження та знаходження компромісних рішень в процесі розгортання наступних стандартів 6G та Wi-Fi 7 у корпоративний сектор. Отримані результати можна використовувати як базу для систем програмно-конфігурованого керування, автоматизованого проектування та початкової і неперервної оптимізації корпоративних телекомунікаційних мереж з використанням машинного навчання з метою покращення їх технічних та економічних показників і мінімізації інформаційних втрат.

Крім того, до вагомих практичних результатів, можна віднести:

1. На основі експериментальних та статистичних досліджень встановлено, що достовірність запропонованих методів становить: 0,997 для оцінювання потужності сигналу на вході приймача із похибкою $\pm 0,3$ дБм при флуктуаціях $\Delta P = \pm 2$ дБм та 0,95 для визначення ефективної швидкості передачі інформації із похибкою до 0,6 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для випадку мінімальної дії факторів впливу у приміщенні. Ступінь адекватності отриманих моделей, становить не менше за 0,95 для потужності сигналу на вході приймача та 0,9 для ефективної швидкості передачі інформації.

2. Метод оцінювання гарантованої пропускну здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж та стохастична модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій дали змогу підвищити швидкодію отримання кінцевого результату до 5 с із достовірністю 0,95 і похибкою оцінювання до 1 дБм та 1 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для мінімальної дії факторів впливу у приміщенні.

3. Отримано коефіцієнти просторових розподілів потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації для приміщень при кутовому та центральному положенні точки доступу в діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц, що дало змогу враховувати та прогнозувати дію статичних і випадкових факторів впливу, а також існування додаткових флуктуацій біля стін приміщення.

4. На основі експериментальних досліджень, отримано коефіцієнти флуктуацій потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації, які дають можливість враховувати взаємозв'язок факторів впливу та параметрів радіоканалу.

5. Експериментальним шляхом встановлено, що у порівнянні із існуючими методами і моделями оцінювання параметрів радіоканалу, запропоновані рішення дали змогу досягти підвищення ефективності оцінювання потужності сигналу на вході приймача на 9% та ефективної швидкості передачі інформації на 12% використовуючи можливості приймально-передавального обладнання.

6. На основі експериментальних досліджень доведено, що використання запропонованої методології оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж в умовах значного завантаження частотного ресурсу, дало змогу підвищити ефективну швидкість передачі інформації у 3 рази, а рівень сигналу покращити на 8% у порівнянні із традиційними методами. Крім того, в 2 рази, вдалося розширити зону гарантованого надання інфокомунікаційної послуги на рівні радіодоступу мережі Wi-Fi .

Наукові та практичні результати проведених досліджень використані в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету в дисциплінах: «Системи комутації та розподілу інформації», «Аналіз і синтез радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій», «Телекомунікаційні системи NGN та мультисервісні системи наступних поколінь», «Системи доступу», а також при виконанні курсових, бакалаврських і магістерських дипломних робіт студентами спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено для підвищення інформаційної та енергетичної ефективності при проектуванні та оптимізації корпоративних мереж на базі радіодоступу у Вінницькій філії ВАТ Укртелеком, ТОВ “АТРАКОМ”, ПрАТ «Лілея», а також у Вінницькому національному технічному університеті.

Отримані в дисертаційній роботі наукові та практичні результати можуть знайти подальше застосування для підвищення технічної ефективності на етапах проектування та оптимізації телекомунікаційних систем та мереж зв'язку на основі радіоканалів будь-яких стандартів, а також у науково-дослідних установах та навчальному процесі вищих навчальних закладів. Достовірність основних теоретичних положень і висновків підтверджується їх збіжністю з результатами математичних та експериментальних досліджень.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно опубліковані у роботах [80-157]. У працях, які опубліковані самостійно (додаток Б): у роботах [Б.9, Б.10] – метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача; [Б.5] – інтегральні показники ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації; [Б.8] – метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж та інформаційна модель радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на основі повного циклу передачі кадру; [Б.12] – метод оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку; [Б.13, Б.19] – стохастична модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій; [Б.14, Б.15, Б.17, Б.18] – узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах; [Б.19–Б.20] – отримано коефіцієнти флуктуацій потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації; [Б.4] – моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації у просторі приміщень.

У працях, опублікованих у співавторстві, авторів належать: [Б.1–Б.4] – окремі розділи у колективних монографіях, що присвячено розширеним дослідженням радіоканалів стандарту Wi-Fi; [Б.6–Б.7] – розроблено інтегральні показники ефективності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на основі статистичного зв'язку між основними параметрами; [Б.11] – моделі оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача для центрального положення точки доступу; [Б.16] – оцінювання достовірності запропонованих методів; [Б.21–Б.25] – проведено аналіз основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж та запропоновано методику експериментальних досліджень із врахуванням факторів впливу; [Б.26–Б.33] – експериментальні дослідження факторів впливу на параметри радіоканалу; [Б.34–Б.40] – проведено аналіз основних параметрів радіоканалів; [Б.41–Б.54] – запропоновано методологію досліджень основних параметрів радіоканалів; [Б.54–Б.78] – запропоновано використання приймальних пристроїв для оцінювання параметрів радіоканалів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на наступних міжнародних науково-технічних конференціях: 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing у 2016 р.; Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS) у 2015, 2017 рр.; Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТ) у 2017 р.; Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях у 2017 р.; Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП) у 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 рр.; Математика. Інформаційні технології. Освіта у 2016 р.; Modern methods, innovation, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference у 2017 р.; Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН) у 2019 р.; Контроль і управління в складних системах (КУСС) у 2014, 2018 рр.; Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки у

2014 р.; Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ» у 2014 р.; Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства у 2013, 2014 рр.; Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС у 2013 р.; Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи у 2014 р.; International Scientific and Practical Conference “World Science” у 2014, 2015, 2016 рр.

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 78 наукових праць, із яких 40 є одноосібними. Серед них 4 колективні монографії; 9 статей у журналах що індексуються в наукометричних базах: Scopus, Web of Science, серед яких 4 у закордонних періодичних виданнях, 5 статей у фахових виданнях України категорії А, що входить до наукометричних баз Scopus, 15 – статей у наукових фахових виданнях України категорії Б, що індексуються в міжнародних базах даних (Index Copernicus, Google Scholar і ін.); 13 в наукових журналах що індексуються в міжнародних базах даних (Index Copernicus, Google Scholar і ін.); 34 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, а також 3 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 405 сторінок друкарського тексту, із них 11 сторінок вступу, 318 сторінок основного тексту, 155 рисунків, 24 таблиць, список використаних джерел із 293 найменувань, 2 додатки на 17 сторінках. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОКАНАЛІВ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 5G/Wi-Fi

1.1 Аналіз основних параметрів і характеристик радіоканалів

Основою сучасних мереж є забезпечення надійного доступу до інфокомунікаційних послуг для значної кількості корпоративних та індивідуальних користувачів. Для цього, широкого поширення отримали системи радіодоступу 5G і Wi-Fi. Але більшість трафіку споживається у приміщеннях і, як правило, 70% на основі технології Wi-Fi. В процесі розгортання мереж, головною проблемою є досягнення необхідних показників по покриттю, пропускній здатності і якості обслуговування в умовах обмеженого енергетичного і частотного ресурсів та існування значної кількості внутрішніх і зовнішніх факторів впливу у корпоративних приміщеннях, що приводить до інформаційних втрат. Саме приміщення висуває ряд вимог в проектуванні та експлуатації мереж, що обумовлює більш раціональне використання стандарту Wi-Fi. 5G технологію раціональніше використовувати для пристроїв, які знаходяться поза межами приміщень, оскільки в приміщеннях необхідно створювати додаткові піко- і нано-комірки, що значно обмежать можливості радіоканалів на частотах 2...6 ГГц та додатково потребують значних інвестицій. За рахунок конвергенції мереж та послуг, обидва цих стандарти мають важливе значення в процесі проектування корпоративних телекомунікаційних мереж для створення радіодоступу, які, в умовах обмеженого енергетичного і радіочастотного ресурсів, будуть однаково реагувати на існування зовнішніх та внутрішніх факторів впливу.

Корпоративна мережа – це телекомунікаційна мережа, яка призначена для обслуговування підприємства чи організації, створення інформаційних ресурсів та забезпечення обміном інформацією між внутрішніми користувачами. Сучасною особливістю розвитку таких мереж є використання систем радіодоступу на основі стандартів 5G і Wi-Fi для забезпечення надійних та високошвидкісних

радіоканалів для корпоративних та індивідуальних користувачів. Стандарти 5G і Wi-Fi є подібними, призначені для підключення та обслуговування значної кількості абонентів і мають технології взаємодії один з одним для сумісного використання частотних ресурсів. З точки зору створення покриття та передачі інформації, у стандартах використовуються подібні методи та засоби, такі як: OFDM/OFDMA, рівні модуляції та кодування, спектральна ефективність та ін. Але для підприємств, де більшість мереж радіодоступу розгортаються в умовах приміщень, перевагою є технологія Wi-Fi за рахунок незначних затрат при проектуванні, обслуговуванні та масштабованості мережі в різноманітних умовах експлуатації. Крім того, розвиток технології Wi-Fi, в напрямку підвищення пропускної здатності радіоканалів, завжди йде попереду та дозволяє створювати внутрішнє середовище із надання доступу до інфокомунікаційних послуг всередині підприємств. Таким чином, в частотних діапазонах 2...6 ГГц при застосуванні технологій 5G і Wi-Fi будуть існувати однакові проблеми при побудові корпоративних телекомунікаційних мереж та існуванні факторів впливу в умовах приміщень.

Враховуючи однакову фізику поширення хвиль та існування факторів впливу, теоретичні та експериментальні дослідження проведено на основі технології Wi-Fi, що дає більший економічний ефект для підприємств.

На сьогодні існує значна кількість методів, які присвячені дослідженню та контролю параметрів мереж. Але, в більшості випадків, вони направлені на мережі масового обслуговування для значної кількості абонентів [163]. У зв'язку із значним ростом об'ємів інформації що передається, такі мережі, потребують не тільки вдосконалення технічної та інтелектуальної бази, а й створення допоміжних мереж для розвантаження головних комутаційних вузлів, якими є приватні та корпоративні мережі із використанням Wi-Fi, що дають можливість отримувати доступ до інфокомунікаційних послуг із застосуванням високошвидкісних радіоканалів. Враховуючи поставлену проблему перед дисертаційним дослідженням, для корпоративних телекомунікаційних мереж, які проектуються на основі технологій стандартів Wi-Fi та 5G, є актуальним

вирішення завдань оцінювання, аналізу і контролю їх параметрів для зменшення інформаційних втрат, які потребують створення нових та ефективних рішень. До задач аналізу можна віднести визначення характеристик, як структури мереж, так і їх компонентів [164]. Якщо, розглядати корпоративні телекомунікаційні мережі як мережі із компонентами, для яких характерно теоретичне забезпечення високопродуктивних каналів, то задачі аналізу можна звести до оцінювання наступних параметрів: пропускна здатність каналу, характеристика поведінки мережі при отриманні доступу до інфокомунікаційних послуг великих об'ємів (наприклад відео у форматі UltraHD), фактори впливу які виникають при підключенні абонентів та розподілу трафіку між ними та ін. Згідно [164], найбільш оптимальним варіантом аналізу вказаних параметрів мережі є словесна формалізація або створення адекватної математичної моделі.

До аналізу можна віднести контроль параметрів мережі, який можна поділити на дві групи: контроль якості послуг і контроль параметрів мережі на каналному та фізичному рівні під час передачі трафіку. Для вирішення задач першої групи, в залежності від виду мультимедійного трафіку та явищ самоподібності, у сучасних мережах існує система контролю якості послуг (QoS – Quality of Service). У зв'язку із цим, для будь-якого потоку інформації можна навести наступну залежність зміни параметрів якості [165]:

$$S(V, t_n, t_p, N_n) = f(L_m, l_n, P, AD_{MAC}, AD_{IP}), \quad (1.1)$$

де V – пропускна здатність потоку при використанні QoS; t_n – затримка при передачі даних; t_p – затримка при операціях розподілу даних; N_n – кількість помилок при передачі; L_m – рівень інтенсивності трафіку; l_n – довжина пакету; P – рівень пріоритету трафіку; AD_{MAC}, AD_{IP} – адреси каналного та мережного рівнів.

Використання тільки математичних методів для оцінювання та контролю параметрів трафіку є недостатнім для сучасних мультисервісних мереж, в першу

чергу із-за широкого поширення радіоканалів, для яких характерне існування великої кількості факторів впливу. Тому, є актуальним, врахування факторів впливу, які безпосередньо пов'язані із впливом характеристик середовища передачі на основні параметри радіоканалів. Враховуючи тенденції розвитку і особливості конвергенції сучасних телекомунікаційних та інфокомунікаційних мереж та послуг, можна стверджувати, що для того, щоб створити ефективні методи оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, в першу чергу, необхідно розв'язати ряд завдань по знаходженню максимально-можливої кількості факторів впливу, які виникають в умовах приміщень, для отримання високоінформативних результатів оцінювання. Вирішення таких завдань, проведено на основі засобів радіомоніторингу для отримання статистичних характеристик зміни параметрів радіоканалу в часі, моделей та методів оцінювання, які враховують дію різного роду факторів впливу та визначення гарантованої пропускної здатності радіоканалів для передачі різних типів трафіку [166 – 213].

Параметри радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж можна описати на основі базової побудови канального та фізичного рівня [213–217], як показано на рис. 1.1.

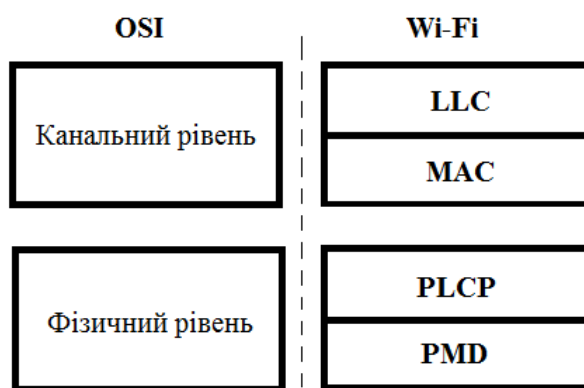


Рис. 1.1. Рівні OSI для радіоканалів

До основних функцій фізичного рівня можна віднести узгодження мережі із радіоканалом та оцінювання параметрів середовища передачі. Як видно із рис. 1,

цей рівень містить в собі два підрівня. Перший з них – PMD (Physical Medium Dependent) підрівень, який залежить від характеристик середовища передачі, та виконує функції формування радіосигналів і оцінювання часових характеристик параметрів прийому та передачі інформації. Даний підрівень виконує функції перетворення кадрів у бітову послідовність із подальшою модуляцією та формуванням електромагнітних хвиль у середовище передачі. Другий підрівень – PLCP (Physical Layer Convergence Protocol), виконує функції ідентифікації, передачі та прийому сигналів. Цей підрівень забезпечує підготовку кадрів, сформованих канальним рівнем. На фізичному рівні використовується технологія розширення спектру. Для стандарту Wi-Fi використовується метод прямої послідовності (DSSS – Direct sequence spread spectrum) для створення частотних каналів із смугою: 22 МГц для стандарту 802.11g, 20 МГц і 40 МГц для стандарту 802.11n і 80 МГц та 160 МГц для стандарту 802.11ac і 802.11ax. Для 5G – до 100 МГц.

Канальний рівень виконує функції по взаємодії мережі із фізичним рівнем та здійснює контроль над помилками. Підрівень LLC (Logical link control) виконує функції керування логічним з'єднанням та забезпечує перевірку і правильність передачі кадрів по цьому з'єднанні. Підрівень виконує формування кадрів на основі наданої інформації із верхніх рівнів моделі OSI. Якщо розглядати обчислювальні мережі, то виконується трансляція кадрів із формату 802.3 до відповідного формату радіодоступу. Як приклад, для стандарту Wi-Fi передбачено наступні основні типи кадрів [214, 217].

Керуючі кадри мережі (management frames) – кадри, які виконують функції передачі службової інформації про конфігурацію мережі для встановлення базового набору послуг (тип радіоканалу, робочий стандарт мережі та інші) та виконання алгоритмів забезпечення безпеки із використанням алгоритмів шифрування [218]. Даний тип кадрів має назву MMPDU (Management MAC Protocol Data Unit) [219] і не містить інформації із верхніх рівнів.

Керуючі кадри (control frames) виконують функції контролю та передачі інформаційних кадрів. Вони поділяються на вісім підтипів, до основних з яких

відносять: запит на передачу RTS (Request to send), дозвіл передачі CTS (Clear to send), підтвердження ACK (acknowledgement) і ін.

Інформаційні кадри (Data Frames) виконують функції перенесення інформації із верхніх рівнів. Цей тип кадрів поділяється на 15 підтипів, в залежності від необхідного режиму для їх передачі.

Підрівень MAC (Media access control) виконує функції доступу до мережі та забезпечує взаємодію обладнання в безпроводній мережі. На даному підрівні використовується MAC адреса, що складається із чотирьох адресних полів довжиною по 6 байт кожне, в яких міститься унікальний ідентифікаційний номер обладнання.

На основі цього, можна припустити, що використовуючи статистичні дані аналізу службової інформації та кількості прийнятих і переданих кадрів на відповідних підрівнях, існує можливість встановити особливості роботи радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, навіть при наявності зовнішніх факторів впливу. На фізичному та каналному рівнях використовуються чотири типи кадрів [214]: PPDU, PSDU, MPDU, MSDU.

PPDU (PLCP Protocol Data Unit) – пакет даних підрівня PLCP, який вміщує в собі службову інформацію про синхронізацію приймача та передавача. Цей кадр перетворюється підрівнем PMD в двійкову бітову послідовність та надходить до модулятора OFDM передавача або в зворотному напрямку у приймачі. Крім того, структура кадру PPDU визначає асинхронну передачу кадрів PSDU між станціями.

PSDU (PLCP Service Data Unit) – сервісний пакет даних підрівня PLCP, який містить інформацію про передавачі та приймачі мережі для їх синхронізації, що додається до кадрів MPDU. Такі кадри виконують операції фізичного рівня.

MPDU (MAC Protocol Data Unit) – пакет даних протоколу MAC підрівня. Він містить в собі службову інформацію для ідентифікації пакетів MSDU. Також, пакет додатково містить циклічний надлишковий код для перевірки правильності передачі, за який відповідає параметр FCS (frame check sequence) – перевірна послідовність кадру.

MSDU (MAC Service Data Unit) – сервісний пакет даних MAC підрівня. Цей пакет вміщує в собі інформацію із верхніх рівнів та службову інформацію підрівня LLC.

Починаючи із стандарту 802.11n існує можливість агрегації кадрів [220]. Це реалізується за допомогою розширень MAC підрівня. Під цим розуміється об'єднання декількох стандартних кадрів в один великий. В такому випадку, формуються агреговані кадри AMPDU (Aggregated Mac Protocol Data Unit) і AMSDU (Aggregated Mac Service Data Unit), які формуються на апаратному та програмному рівнях відповідно. Такі кадри є чутливими до існування завад у радіоканалі і при високих швидкостях передачі, існує висока імовірність появи помилки.

Для сформованих кадрів фізичний рівень мережі виконує такі функції [214, 216]:

- CS/CCA (Carrier Sense / Clear Channel Assessment) – функції детектування носійної сигналу в мережі та визначення вільності радіоканалу для здійснення передачі пакетів. В першу чергу, ця функція виконує оцінку енергетичних характеристик сигналу на підрівні PMD.

- Tx, Rx (Transmit, Receive) – функції передачі та прийому пакетів. Ці дві функції вмикаються після виконання команд CS/CCA і надають точці доступу необхідний режим роботи на передачу і прийом кадрів. Із-за особливостей побудови обладнання стандарту Wi-Fi, такі режими не можуть працювати одночасно. Тому, для забезпечення високої якості передачі, при надходженні переданого кадру на приймач, в зворотному напрямку, передається кадр підтвердження успішного прийому ACK. При наявності завад, що приводять до втрат пакетів, існує лічильник очікуваних кадрів, які не дійшли до пункту призначення.

Починаючи із стандарту 802.11n існує залежність пропускну здатності радіоканалів від індексу модуляції та схеми кодування, так званої MCS (Modulation & Coding Scheme) [214]. Це дозволяє підвищити пропускну здатність фізичного рівня до 72,2 Мб/с, по відношенню до попередніх стандартів. Крім

того, фізичний та каналний рівень мають розширення, які в свою чергу дають можливість створення так званих високопродуктивних радіоканалів (НТ – high throughput), що дозволяє підвищувати пропускну здатність до теоретичних 600 Мб/с. Це досягається за рахунок використання радіотехнології МІМО та технології розширення спектру, створенням частотних каналів шириною 40 МГц.

Кожен радіоканал може працювати у трьох режимах роботи [214]. Перший із них – режим із низькою швидкістю передачі (Non НТ). Цей режим застосовується для зворотної сумісності із попередніми стандартами, які використовують частотний канал зі смугою 20 МГц. Кожен такий канал вміщує 62 підносійних із смугою 312,5 кГц, із яких перших шість та останніх п'ять, є недіючими та виконують функцію захисного інтервалу. Центральна підносійна, також, є недіючою та використовується для безпосереднього з'єднання. Таким чином, для передачі застосовується 52 підносійні, з яких 48 для передачі даних та чотири для синхронізації приймача із передавачем, як показано на рис. 1.2.

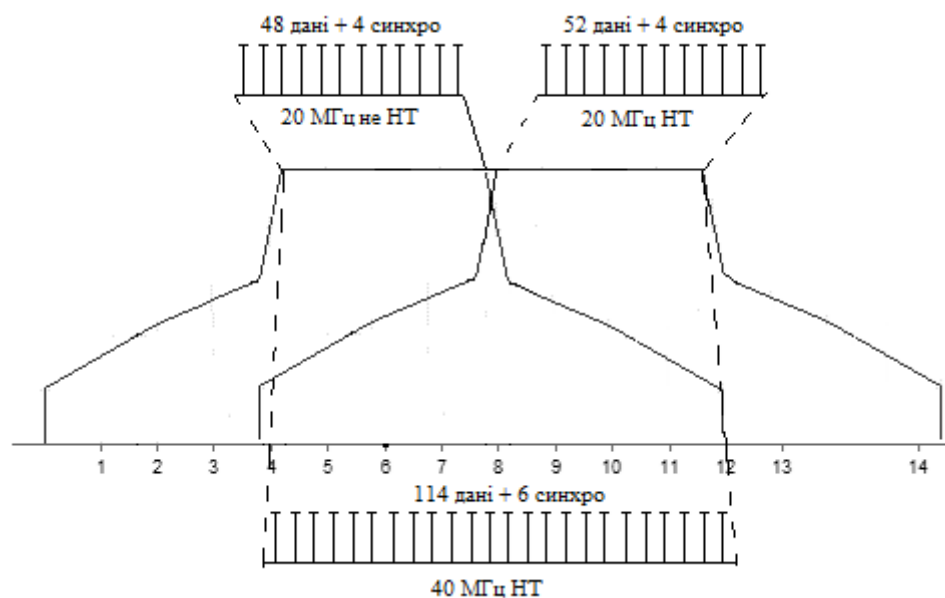


Рис. 1.2. Режими передачі радіоканалу

Такий режим роботи буде встановлювати пропускну здатність на рівні найменш продуктивного пристрою у мережі. Другий режим роботи, полягає у використанні високо-продуктивного радіоканалу для смуги 20 МГц (НТ). Тут, використовується чотири додаткові підносійні, за рахунок зменшення захисного

інтервалу. Це дає ефект незначного збільшення пропускної здатності із-за збільшення ефективної смуги пропускання. При використанні частотного каналу шириною 40 МГц (НТ) використовуються 114 підносійних, з яких 108 для передачі даних, а шість для синхронізації [214]. Теоретично, такий канал дає збільшення пропускної здатності більше ніж у два рази в порівнянні із каналом 20 МГц, за рахунок використання частини захисного інтервалу. Це об'єднання двох 20 МГц частотних каналів, які поділяються на головний (номер каналу) та канал розширення (може бути як нижній так і верхній). Для даного режиму роботи відсутня сумісність з пристроями попередніх стандартів.

Третій режим роботи, є суміщеним типом (НТ mixed), який отримав найбільше поширення та встановлюється виробниками обладнання за замовчуванням у більшості сучасних точок доступу. Цей режим, дозволяє вмикати високопродуктивні радіоканали для абонентських пристроїв, які його підтримують, а при наявності пристроїв попередніх стандартів використовується режим із низькою швидкістю передачі, але тільки на період обміну даними.

Як відомо [220], для радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж можуть використовуватись неліцензійні частотні діапазони 2,4 ГГц та 5 ГГц. Частотний діапазон 2,4 ГГц має смугу частот Δf – 83,5 МГц (від 2,4 ГГц до 2,4835 ГГц) та відстань між носійними 5 МГц. При використанні частотних каналів шириною 20 МГц в неліцензійному діапазоні частот Δf може існувати три канали які не перекриваються і один канал шириною 40 МГц. Для діапазону 5 ГГц існує поділ на три піддіапазони, для кожного з яких відведена смуга у 100 МГц [148]: нижній – від 5,150 ГГц до 5,250 ГГц; середній – 5,250 ГГц до 5,350 ГГц; середній розширений – від 5,470 ГГц до 5,725 ГГц; верхній – від 5,725 ГГц до 5,825 ГГц. Тут, відстань між носійними частотних каналів становить 20 МГц, тому при використанні каналів шириною 20 МГц, відсутній перетин та вплив сусідніх каналів, а при застосуванні $\Delta f = 40$ МГц, можна отримати до 12 каналів на відміну від діапазону 2,4 ГГц. Єдиним недоліком цього, є законодавство країн, що не завжди дозволяє вільно використовувати неліцензійний діапазон повністю без дозволу.

Тоді, можна записати:

$$\frac{f_{2,4}}{f_5} \approx \frac{\lambda_5}{\lambda_{2,5}};$$

де λ – довжина хвилі; f – частота хвилі в середовищі передачі.

Враховуючи доступні смуги, отримаємо наступні співвідношення:

$$\frac{2,401...2,4835}{5,150...5,350} \approx \frac{0,1249...0,1207}{0,058...0,056} \approx 2,08...2,23,$$

$$\frac{2,401...2,4835}{5,470...5,825} \approx \frac{0,1249...0,1207}{0,055...0,051} \approx 2,19...2,45.$$

Як можна бачити, різниця між діапазонами 2,4 ГГц та 5 ГГц складає більше двох раз. Це означає, що хвилі діапазону 5 ГГц мають в два рази меншу здатність огинати перешкоди. Для таких хвиль рівень затухання буде вищим при наявності значної кількості об'єктів у приміщенні та меншу проникність через архітектурні перешкоди [83, 222]. Аналогічно, передбачається використання діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц стандартом 5G, а також частотних діапазонів, які знаходяться між ними, такі як n38 (2570 – 2620), n41 (2,496 – 2,690 ГГц), n78 (3.300 – 3.800 ГГц), n79 (4400 – 5000) та ін. Враховуючи отримані частотні співвідношення, можна говорити, що фізика поширення хвиль та дія факторів впливу є подібною для частотного діапазону від 2 ГГц до 6 ГГц, як для неліцензійних діапазонів Wi-Fi так і для ліцензованих 5G.

Підвищення ефективності радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж передбачено специфікаціями стандартів за рахунок вдосконалення каналного та фізичного рівнів [221–231]: розширення структури кадру, підтримка каналів із смугою 80 МГц та 160 МГц у діапазоні 5 ГГц, підтримка модуляції 256-QAM та 1024-QAM, вдосконалення технології MIMO та формування направленої діаграми спрямованості (beamforming) і ін.

Для оцінювання параметрів каналного та фізичного рівня радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж запропоновано використовувати відповідну службову інформацію у прийнятих та переданих кадрах. Вона міститься на відповідних підрівнях, і враховуючи модель OSI, її можна представити як показано на рис. 1.3.

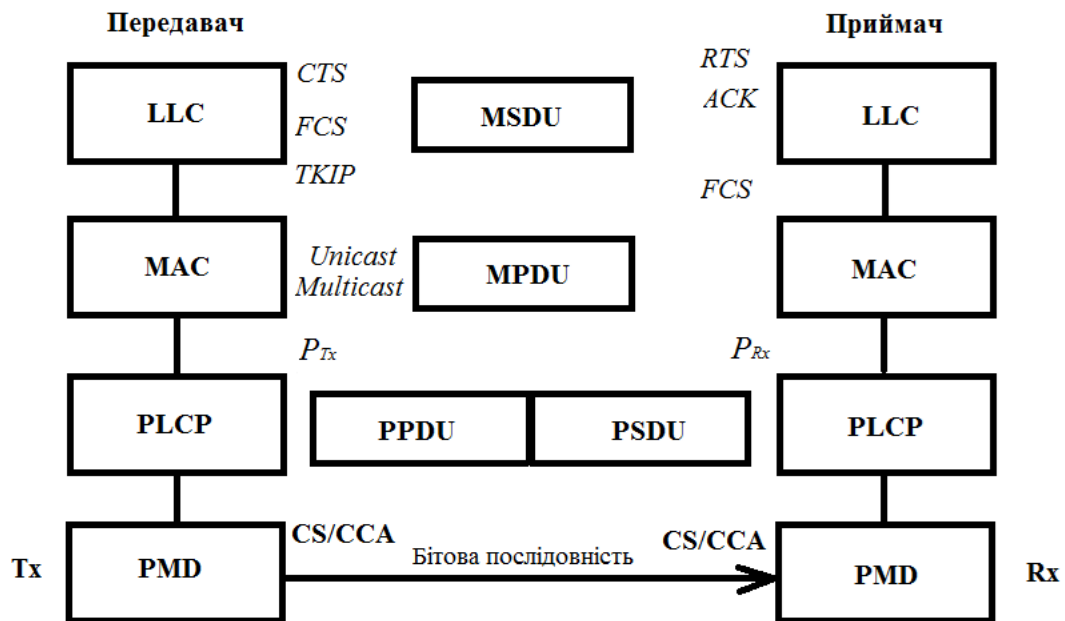


Рис. 1.3. Структура фізичного та каналного рівнів для пари «приймач-передавач»

Типовий радіоканал корпоративної телекомунікаційної мережі містить в собі дві однакових пари передавач-приймач для прямого та зворотного напрямків. Для спрощення розглянемо одну з них. До основних параметрів радіоканалу можна віднести пропускну здатність V_{pl} (теорема Шенона-Хартлі) [225], на основі якої визначається ефективна швидкість передачі інформації за одиницю часу V_{eff} [82], що безпосередньо залежить від потужності сигналу передавача P_{Tx} та рівня потужності на вході приймача P_{Rx} [140]. Як приклад, рівень потужності передавача Wi-Fi визначається специфікацією стандарту [226–230], може мати значення до 250 мВт, але для узгодження із законодавствами багатьох країн, як правило, виробники обладнання встановлюють верхню границю в межах 100 мВт.

Структура на рис. 1.3 показує, що умовно приймальні та передавальні пристрої поділяються на дві частини: апаратну (підрівень PMD) та програмну (підрівні PLCP, MAC, LLC). В результаті чого, параметри радіоканалу можна поділити на дві відповідні групи: енергетичні (потужність сигналу на вході приймача, потужність випромінювання передавача, сигнал/шум і ін.) та інформаційні (пропускна здатність радіоканалу, ефективна швидкість передачі інформації і ін.).

Рівень потужності прийнятого сигналу (RSSI) – основний енергетичний параметр 5G/Wi-Fi мереж радіодоступу, що впливає на кількість прийнятих кадрів PPDU за одиницю часу без помилок. Цей параметр, із-за високого коефіцієнта затухання та дії навіть незначних факторів у середовищі передачі, має найбільший вплив на ефективну швидкість передачі інформації [122].

Інформаційні параметри пов'язані із сеансами передачі кадрів по радіоканалах. Існує три основних типи сеансів передачі кадрів [231]: індивідуальний (Unicast), багато-спрямований (Multicast) та трансляція (Broadcast). Індивідуальний сеанс передбачає передачу кадру від одного пристрою до іншого. Багато-спрямований сеанс дозволяє здійснювати надсилання кадрів від одного пристрою до певної групи пристроїв, тим самим використовуючи менше ресурсів фізичного радіоканалу. Третій тип сеансу забезпечує передачу кадрів до всіх пристроїв у мережі.

Для мереж радіодоступу існує ряд особливостей при передачі кадрів за допомогою вказаних вище сеансів. Сеанс передачі інформації визначається протоколом доступу MAC підрівня. Даний протокол містить в собі дві схеми доступу [232]. Перша – це функція узгодження розповсюдження DCF (Distributed coordination function), яка використовується для створення асинхронного, конкурентного та розподіленого доступу до каналів. Друга схема передбачає виконання функцій центра розповсюдження і створення централізованого доступу до фізичного каналу для всіх абонентів, використовуючи технологію множинного доступу із контролем несучої та виявлення колізій CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection).

Розглянемо індивідуальний сеанс передачі, схема роботи якого наведено на рис. 1.4.

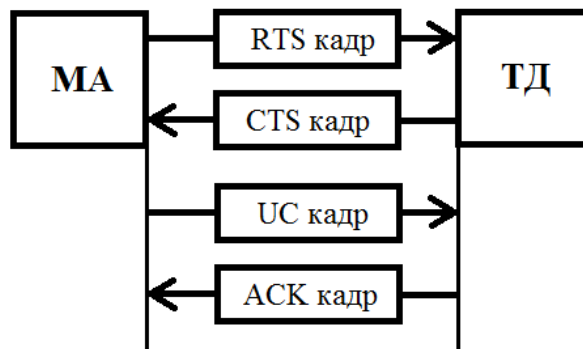


Рис. 1.4. Схема передачі кадрів для індивідуального сеансу по радіоканалу

Індивідуальний сеанс передачі викається на етапі створення радіоканалу для передачі кадру [233]. Передавач мобільного абонента (МА) створює запит на дозвіл передачі із формуванням кадру RTS. Приймач точки доступу (ТД) або іншого мобільного пристрою, із необхідною адресою, отримавши кадр формує в зворотному напрямку кадр підтвердження на готовність прийому (CTS).

Будь-які інші приймачі в мережі які отримали RTS кадр, в цей же час, залишаються в режимі прослуховування без трансляцій кадрів, для уникнення колізій. Інформація про період очікування записується у відповідному полі кадру RTS. Потім виконується передача інформаційного кадру UC із поміткою Unicast. Після вдалого прийому цього кадру приймачем, в зворотному напрямку відсилається кадр підтвердження із параметром ACK. Якщо передача не була виконана успішно, то передача інформаційного кадру здійснюється повторно.

Схема передачі інформаційних кадрів для сеансу багато-спрямованої передачі кадру, показана на рис. 1.5.

Для сеансу багато-спрямованої передачі кадру передбачено використання часткового асинхронного режиму [231]. В цьому випадку для здійснення багато-спрямованої передачі, мобільному абоненту (МА) необхідно виконувати індивідуальну передачу кадрів безпосередньо до точки доступу (ТД). Таким чином, кожен MC кадр (Multicast) передається як UC кадр на основі схеми, яка показана на рис 1.4.

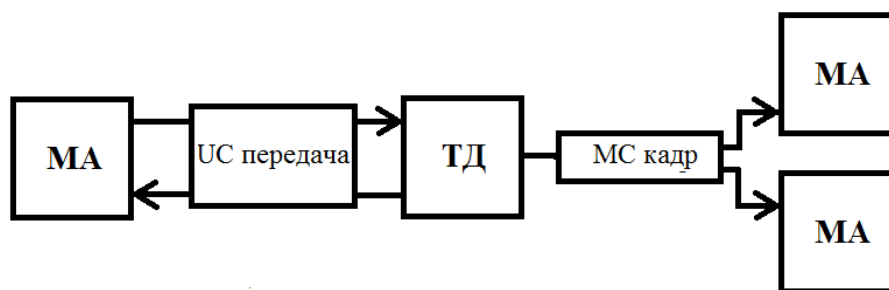


Рис. 1.5. Схема передачі кадрів для сеансу багато-спрямованої передачі кадру

При підтвердженні цілісності отриманого кадру, точка доступу формує кадр багато-спрямованої передачі МС із адресою групи мобільних абонентів мережі. В даному випадку існує суттєва перевага – більш раціональне використання пропускної здатності радіоканалу на відміну від індивідуального режиму, що є дуже критичним фактором у умовах обмежених ресурсів. Але з іншого боку, тут присутні і суттєві недоліки, суть яких полягає в наступному. Стандарт Wi-Fi не передбачає передачу кадру підтвердження успішного прийому АСК для сеансу багато-спрямованої передачі. Тому, тут не виконується повторна передача кадру при наявності в ньому помилок на MAC підрівні приймача. Також, при відсутності підтвердження точка доступу не отримує інформацію про виникнення колізії з іншими кадрами на стороні приймача та продовжує передавати послідовність кадрів. Це приводить до отримання великої кількості кадрів із помилками, в результаті чого зменшується ефективна швидкість передачі інформації.

Оскільки, на ефективну швидкість передачі впливає кількість активних абонентів мережі [234], тому при сеансах багато-спрямованої передачі, пропускна здатність буде поділятися між активними абонентами. Крім того, при перебуванні абонента в енергозберігаючому режимі очікування, який не належить до групи прийому, то під час трансляції МС пакету виконується його пробудження.

Отже, при попаданні мобільного абонента в зону дії сусідніх мереж із сеансами багато-спрямованої передачі, приймач буде додатково до УС пакетів отримувати МС пакети. Дане питання є актуальним в зонах із великою кількістю розгорнутих мереж радіодоступу, що на даний час доволі поширене явище у

корпоративному секторі. Це підтверджують дослідження у роботі [235], де встановлено, що ще у 2005 р., в корпоративній сфері, спостерігалось наявність кадрів багато-спрямованої передачі в середньому 5..10% від загального трафіка.

Дослідження каналного та фізичного рівнів показують, що до інформаційних параметрів можна віднести статистичні характеристики, які супроводжують передачу кадрів у радіоканалі. Тому, запропоновано наступні параметри для подальших досліджень:

- N_{MSDU}^{Tx} , N_{MSDU}^{Rx} – кількість сформованих для передачі кадрів MAC рівнем передавача та кількість цілих і відновлених кадрів на MAC рівні приймача;

- N_{MPDU}^{Tx} і N_{MPDU}^{Rx} – кількість сформованих та переданих кадрів протоколу MAC рівня. В даному випадку на цьому підрівні можна виділити лічильник помилок N_{FCS} у прийнятих кадрах N_{MPDU}^{Rx} .

- N_{NIC}^{Rx} – кількість зашифрованих кадрів, в яких вдало розшифровано конфігурацію апаратного інтерфейсу NIC (Network interface controller).

- N_{fail}^{NIC} – кількість зашифрованих кадрів в яких конфігурація NIC нерозшифрована.

- N_{TKIP} – кількість виявлених помилок при передачі інформаційних полів протоколу цілих часового ключа TKIP.

- N_r – кількість запитів повторної передачі для вдало прийнятих кадрів MSDU;

- $N_{m,r}$ – кількість вдало отриманих кадрів для яких запит на повторну передачу відсилався більше одного разу;

- N_f – кількість втрачених MSDU пакетів при передачі після перевищення кількості дозволених повторних запитів;

- N_d – кількість кадрів, які на приймальній частині при обробці каналних даних визначено як дублюючі;

- N_{ACK} – лічильник кількості кадрів підтвердження успішного прийому, які не були отримані;

- N_{Mcast}^{Tx} – кількість вдало переданих кадрів помічених як «сервер - група клієнтів» для сеансів багато-спрямованої передачі;

- N_{Mcast}^{Rx} – кількість вдало прийнятих кадрів помічених для сеансів багато-спрямованої передачі.

1.2 Аналіз методів оцінювання енергетичних параметрів радіоканалів

Аналіз існуючих наукових робіт показує, що на сьогодні, дослідження процесів передачі інформації у корпоративних телекомунікаційних мережах набули широкого поширення серед закордонних та вітчизняних авторів. Виділимо роботи, які присвячені дослідженням енергетичних параметрів сигналу.

Корпоративна телекомунікаційна мережа 5G/Wi-Fi розглядається як мережа радіодоступу із точкою доступу та рухомими абонентами [110]. В такому випадку, головним параметром, є потужність випромінювання сигналу передавачем точки доступу. Оскільки, така мережа найчастіше створюється для складних забудов, то потужність передавача можна записати так [5]:

$$P_{Tx} = \frac{16kT\pi^2 D^\mu \gamma \xi \Delta f L}{D_0^{\mu-2} \lambda^2 G_1 G_2}, \quad (1.2)$$

де T – шумова температура приймача, k – стала Больцмана, D – відстань від передавальної до приймальної антени, D_0 – базова відстань, G_1, G_2 – коефіцієнти підсилення антен передавача та приймача, L – загасання у радіоканалі, Δf – смуга частот приймача, λ – довжина хвилі, ξ – коефіцієнт збільшення шумової температури за рахунок завад, γ – відношення сигнал/шум для забезпечення необхідної імовірності помилки, μ – параметр поширення сигналу.

Після проходження сигналу через середовище передачі, рівень потужності сигналу на приймальній частині можна записати наступним чином [236]:

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx} G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi D)^2}. \quad (1.3)$$

Вираз (1.3) є узагальненою моделлю оцінювання потужності на вході приймача. Але, на практиці така модель не враховує ряд негативних факторів впливу.

В роботі [7] було встановлено вплив положення приймача у просторі, відстані між приймачем та передавачем, часу вимірювання, завад від інших пристроїв та архітектурних перешкод на потужність сигналу на вході приймача. Виявлено існування значних флуктуацій та залежність енергетичного параметра від конкретного виробника обладнання із-за різних частот квантування та дискретизації. Показано, що різне положення пристрою змінює рівень сигналу на 2 дБм, а відхилення у просторі на 1 м додає до флуктуацій 6 дБм. Із-за подібності стандартів 802.16 і 802.11 [237], для них характерно існування завад однакового типу у середовищі передачі. В роботі [238] оцінено причини та наведено методи боротьби із міжканальними інтерференційними завадами для багатопозиційних сигналів. В результаті чого встановлено, що при використанні великої кількості підносійних, покращується пропускна здатність радіоканалу, але підвищуються вимоги до параметра сигнал/шум. Одним із вагомих факторів, що необхідно враховувати це тип модуляції, і як показано у дослідженнях [239, 240], одним із критеріїв ефективності радіоканалу є передача інформації із відповідним рівнем сигнал/шум.

Одним із напрямків досліджень, де використовуються оцінювання потужності сигналу на вході приймача, є широко застосовувані ідентифікаційні методи для визначення положення пристроїв у зоні покриття мережі [241–242]. Основним інформативним параметром в цьому напрямку є параметр RSSI та його затухання у вільному просторі із застосуванням додаткових маяків для зменшення флуктуацій сигналу. В роботі [243] проведено вимірювання потужності сигналу в умовах приватного приміщення із використанням мобільного абонентського пристрою. Встановлено, що рівень сигналу, із збільшенням відстані між точкою доступу та мобільним пристроєм, зменшується, а параметри завантаження та відвантаження інформації залишаються сталими на відстанях до 8 м. Існування шумів, показало зниження загального рівня сигналу. Інші дослідження проведено

у більших масштабах для міста Патри у Греції, що враховує складну забудову [244]. В роботі проведено дослідження трьох моделей затухання для діапазону 2,4 ГГц: вільного простору, Хатта та Уолфіш-Ікегамі. Встановлено, що для складних забудов застосування моделі вільного простору є недоцільним, а дві інші характеризуються своїми перевагами та недоліками. Крім того, було встановлено, що поява затухань із-за архітектурних перешкод можуть мати нормальний розподіл для логарифмічних значень.

В роботі [245] розглянута безпроводна мережа для сенсорів концепції інтернету речей. Особливістю такої мережі є те, що в ній можуть знаходитись пристрої, які мають різні каналні та фізичні рівні. Це об'єднує різні технології передачі інформації. Основою для таких мереж є вузли доступу, які повинні забезпечувати ефективне покриття. В роботі пропонується дві технології для побудови ефективних сенсорних мереж: Bluetooth та IEEE 802.11. Аналогічні дослідження були проведені у роботі [247]. Але тут запропоновано типову структуру мережі, де стандарт Wi-Fi використовується як проміжна магістраль для з'єднання вузлів об'єднання сенсорів. В такому випадку, головна точка доступу може розміщуватись в куті приміщення, а ретранслятори як в кутах, так і по центру приміщення.

Питання підвищення ефективності мережі розглянуто у роботі [245], на основі отримання ефективної топології для інтернету речей. Рішення полягає в узгодженні механізму керування мережею із додатками верхніх рівнів, для керування потужністю випромінювання та живленням. Для підтвердження цього, наведено дослідження у роботі [248]. Тут показано зміну рівня сигналу мобільних пристроїв протягом значного терміну використання. Саме використання керування потужністю сигналу, дає збільшення часу автономної роботи з незначними втратами пропускної здатності радіоканалу. Результати досліджень у роботах [249] і [113] показують існування порогового значення рівня потужності. Встановлено наступні особливості: для абонентського пристрою встановлений рівень випромінювання 10^{-6} Вт/м на відстані від одного і більше метрів від ТД; при передачі інформації у радіоканалі потужність збільшувалась на порядок;

рівень сигналу близько $-55...-45$ дБм (враховуючи розкид потужності ± 10 дБм) на вході приймача ТД має мінімальний вплив на ефективну швидкість передачі інформації, а всі коливання в більшості випадків залежать від завантаження суміжних та сусідніх частотних каналів. Це приводить до певних обмежень для сеансів гарантованої передачі кадрів при існуванні зовнішніх та внутрішніх факторів впливу.

Як показано в роботі [19], оцінювання параметра RSSI (потужність сигналу на вході приймача) може мати асиметричний характер при застосуванні нормального закону розподілу. Цей фактор має різні відхилення у різних виробників приймального обладнання, що в результаті підвищує похибку оцінювання.

Питання оцінювання дії факторів впливу на пропускну здатність радіоканалу Wi-Fi для невеликих приміщень у діапазоні 5 ГГц розглянуто у роботі [20]. Дослідження проведено на основі математичного моделювання за методом Монте Карло, що в свою чергу має значні обмеження відносно врахування випадкових факторів середовища передачі. На відміну від цього, в роботі [21] отримано досить значну кількість результатів параметра RSSI для шести багатоповерхових споруд в двох країнах ЄС. Встановлено, що хвилі діапазону 5 ГГц мають значно більші затування в радіоканалі. Найбільший прояв виявлено у вертикальному напрямку де використовуються матеріали із вищою густиною. Це показує, що хвилі діапазону 5 ГГц мають вищий коефіцієнт затування при проходженні через архітектурні перешкоди ніж у діапазоні 2,4 ГГц.

Одним із ефективних методів аналізу характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж є спектральний аналіз, який можна виконати за допомогою абонентського пристрою [140]. Для оцінювання енергетичних параметрів використовується так звана огинаюча передавальна спектральна характеристика. Для прикладу, розглянемо спектр шостого частотного каналу діапазону 2,4 ГГц, який наведено на рис. 1.6.

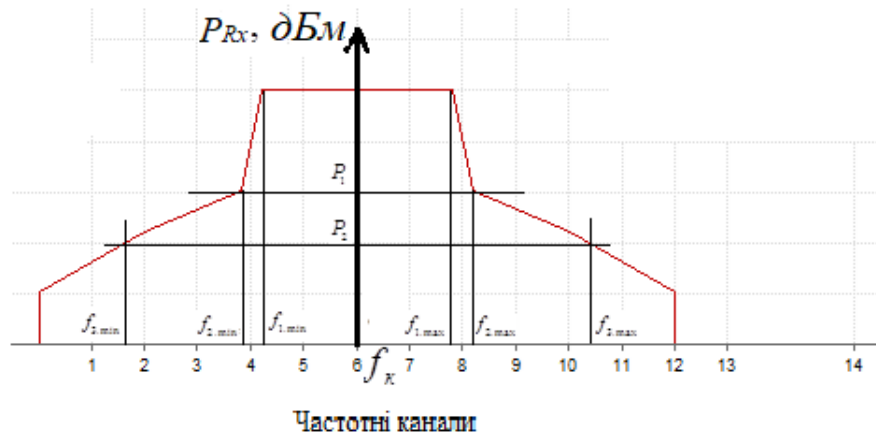


Рис. 1.6. Параметри частотного спектру для радіоканалу зі смугою 20 МГц діапазону 2,4 ГГц

На спектрі розрізняють дві частини: головна пелюстка, в якій переноситься інформація та бічні пелюстки, які створюють інтерференційні завади на інші частотні канали. Рівень потужності сигналу P_{Rx} на спектральному зображенні визначається в діапазоні частот $(f_{lmin}; f_{lmax})$, що становить -9 МГц та +9 МГц відносно центральної частоти каналу f_k . Смуга головної пелюстки становить 22 МГц і знаходиться в межах $(f_{2min}; f_{2max}) = (-11 \text{ МГц і } +11 \text{ МГц})$, на яких потужність сигналу спадає до рівня $P_1 = P_{Rx} - 30 \text{ дБм}$.

Рівень $P_2 = P_{Rx} - 50 \text{ дБм}$ показує межу бічних пелюсток спектра, що займають смугу частот $(f_{3min}; f_{3max}) = (-22 \text{ МГц, } +22 \text{ МГц})$. В ідеальному випадку, при відсутності завад у радіоканалі та збереженні форми спектру у вказаних межах, забезпечується максимальні параметри для передачі інформації

Спектр частотного каналу діапазону 5 ГГц, наведено на рис. 1.7.

На рис. 1.7 показано типовий спектр каналу зі смугою $\Delta f = 40 \text{ МГц}$. Смуга частот головної пелюстки спектра становить 20 МГц, а ширина бічних пелюсток – 40 МГц. Загальна ширина спектра становить до 60 МГц, що буде створювати міжканальні завади для інших мереж розташованих на сусідніх каналах. Аналогічні спектри будуть спостерігатись для частотних каналів 80 МГц та 160 МГц, але із більшим перекриттям частотного спектра.

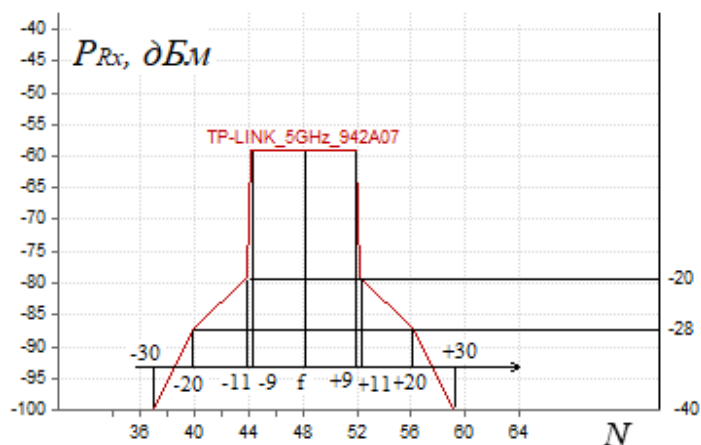


Рис. 1.7. Спектр частотного каналу зі смугою 40 МГц діапазону 5 ГГц

Аналіз існуючих досліджень дає підстави стверджувати, що оцінювання потужності сигналу на вході приймача у приміщеннях є досить значною проблемою. Процес оцінювання супроводжується значною кількістю випадкових факторів, які впливають на точність і достовірність кінцевого результату. Тому, є актуальним, постановка завдання розроблення методу оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача із врахуванням процесів поширення сигналів та внутрішніх і зовнішніх факторів впливу у корпоративних приміщеннях. Оскільки, рівень потужності сигналу на вході приймального пристрою є низьким та чутливим до багатьох факторів впливу, то для розв'язання такого завдання застосуємо методи експериментальних досліджень, на основі програмно-апаратних засобів моніторингу, із імітацією дії факторів впливу та методи статистичного і регресійного аналізів.

1.3 Аналіз методів оцінювання інформаційних параметрів радіоканалів

Ємність радіоканалу можна визначити за допомогою формули Шеннона-Хартлі [250]. Враховуючи згасання у радіоканалі і пропускну здатність для пари приймач-передавач, пропускну здатність можна записати так:

$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} |L^2| \right). \quad (1.4)$$

де Δf – смуга частот каналу; S/N – рівень сигнал/шум; L – параметр затухання сигналу.

Враховуючи технологію MIMO, при існуванні n випромінюючих антен та m приймальних антен пропускна здатність радіоканалу складе:

$$C = \Delta f \log_2 \left(\left| L_m + \frac{E_b}{N_0 m} L_{m \times n} L'_{m \times n} \right| \right), \quad (1.5)$$

де L_m – матриця затухань сигналів у приймачах MIMO; $L_{m \times n}$ – матриця характеристик затухання; $L'_{m \times n}$ – зворотна матриця характеристик затухання; E_b – енергія сигналу на один біт інформації; N_0 – густина потужності шумів.

Вирази (1.4) і (1.5) визначають теоретичну верхню границю пропускної здатності для радіоканалу. В реальних умовах, на такий параметр діє велика кількість факторів впливу, тому оцінювати пропускну здатність таким способом є недоцільним. Для вирішення цього існує велика кількість способів оцінювання пропускної здатності радіоканалів, як розширення можливостей формули Шеннона-Хартлі, так і на основі побудови інформаційних моделей. Для виявлення особливостей оцінювання параметра пропускної здатності у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж та існування факторів впливу, виконаємо аналіз існуючих досліджень.

Як приклад, використання формули Шеннона-Хартлі можна виділити роботу [251], де підвищення пропускної здатності здійснено за рахунок збільшення щільності розташування випромінюючих пристроїв. Тоді, залежність щільності реальної пропускної здатності від теоретичної швидкості передачі інформації на МАС рівні, можна визначати як:

$$\Omega(\lambda, W) = \frac{E}{A} \left[\sum_{i \in K} \sum_{i \in \Phi^k} w^k \min(\xi_1 \log_2(1 + \xi_2 \cdot S/N), \eta_{\max}) \right], \quad (1.6)$$

де ξ – коефіцієнт ефективності використання смуги пропускання; k – номер частотного каналу; A і E – густина розміщення точок доступу та абонентів; Φ – кількість активних точок доступу; η_{\max} – коефіцієнт максимальної спектральної ефективності; λ – щільність точок доступу; K – кількість радіоканалів, які не перекриваються; W – ширина частотного діапазону; $w^k = W / K$ – ширина смуги радіоканалу.

Як видно із наведеного виразу, для підвищення пропускної здатності радіоканалу необхідно виконувати ущільнення розташування точок доступу, для мінімізації впливу інтерференційних завад та архітектурних перешкод.

В роботі [252], розглянуто МІМО-системи радіозв'язку, в яких передача даних здійснюється паралельними власними підканалами та запропонований підхід до розрахунку пропускної здатності МІМО-системи. Але результати чисельного моделювання запропонованої моделі не враховують випадкові фактори впливу для просторових розподілів сигналу, що дає похибку відносно реальних характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж.

На пропускну здатність радіоканалу мають вплив параметри каналного та фізичного рівнів, які визначають кількість службової інформації, необхідної для гарантованої доставки пакетів сформованих на прикладному рівні. Для оцінювання таких параметрів значного поширення отримали аналітичні моделі розрахунку, які базуються на специфікаціях стандарту побудови радіоканалів. Одними із таких моделей можна виділити аналітичні моделі для розрахунку пропускної здатності для радіоканалів 802.11 та їх взаємодії із провідними каналами стандарту 802.3 [55–57]. Такі моделі можна назвати *інформаційними*, оскільки за ними можна спрогнозувати кількість інформації, яка передається у радіоканалі за одиницю часу та виділити службову та корисну складові.

Починаючи із стандарту 802.11n, передбачається використання високопродуктивних радіоканалів із технологією розширення спектра. В роботі [50] проведено дослідження впливу 40 МГц каналів на продуктивність мережі. Встановлено, що збільшення смуги каналу приводить до підвищення пропускної

здатності, а також до зменшення зони покриття та підвищення чутливості до завад. Це можна вважати фактором впливу, що створює компроміс вибору між смугою частотного каналу та його довжиною.

У роботі [58], для оцінювання параметрів мережі радіодоступу, пропонується перетворення фізичної мережі у модель із меншою кількістю вузлів. Це дає можливість виконувати оцінювання параметрів з меншою кількістю математичних обчислень для певної кількості активних абонентів у мережі. Модель оперує імовірнісними характеристиками обирання часового слоту, та характеризується складністю вибору початкових умов.

При побудові математичних моделей радіоканалів можна виділити роботу [59], де проведено оцінювання інформаційної ефективності технології побудови системи OFDM-FHSS та порівняння її із OFDM. В роботі проведено розрахунок пропускної здатності на основі інформаційної та енергетичної ефективності із використанням параметрів максимально-допустимої швидкості передачі інформації із врахуванням частотних каналів та модуляції. Проте, в роботі не враховується службова та корисна інформація, а також існування помилок у кадрах. Врахування бітової помилки та циклу передачі кадрів із помилками запропоновано в моделях у роботах [60, 253]. Отримані моделі спрямовані на виявлення помилок із застосуванням QoS, але непов'язані з енергетичними характеристиками радіоканалу. Модель пропускної здатності радіоканалу, що визначається через максимальну кількість проходження кадрів MAC рівня, запропоновано у роботі [61]. Максимальна пропускна здатність радіоканалу визначено як функцію, що залежить від кількості кадрів MSDU із врахуванням циклу передачі RTS/CTS та технології CSMA/CD, але без врахування зв'язку із енергетичними параметрами.

Із існуючих методів оцінювання швидкості передачі інформації можна виділити роботу [63]. Запропоновано два методи де використовується оцінювання пропускної здатності за допомогою підрахунку помилок у пакетах із новим алгоритмом перемежування. Такі методи мають переваги над класичними методами, що використовують параметр сигнал/шум і дають можливість

покращувати енергетичні параметри та параметри пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. Інший метод [64] передбачає визначення оптимальної пропускної здатності радіоканалу оцінюванням рівня дисперсії між символами пакету. В даному випадку, виконується симуляція передачі пакету на різних параметрах схеми MCS. Результат визначає оптимальний режим передачі. Запропоновані методи використовують оцінювання помилок у кадрах і на основі цього обирають оптимальний режим роботи схеми MCS. Але це не дає повної інформації про існуючі процеси, завади і перешкоди у радіоканалі.

Таким чином, аналіз існуючих досліджень показав, що пропускна здатність радіоканалу визначається кількістю службової та корисної інформації. На цей параметр діють фактори впливу і він залежить від параметра потужності сигналу на вході приймача та додаткових інформаційних факторів, які необхідно враховувати. Тому, на даному етапі введемо поняття *ефективної швидкості передачі інформації*, яка оцінюється на прикладному рівні.

На основі значної кількості власних експериментальних досліджень встановлено, що реальна або ефективна швидкість передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж значно відрізняється від значень пропускної здатності, що визначені у специфікаціях відповідних стандартів і може бути розрахована за допомогою інформаційних моделей [105, 113, 126, 152]. Це пояснюється додаванням службової інформації у радіоканал, існуванням завад і перешкод у приміщеннях. Якщо, у специфікаціях вказується пропускна здатність перетворення бітової швидкості на підрівні PMD, то ефективна швидкість передачі оцінюється прикладним додатком. Кількість службової інформації можна оцінити розглядаючи побудову пакетів та кадрів які формуються на відповідних рівнях OSI мережі.

Розглянемо склад службової інформації для одного циклу індивідуального сеансу передачі інформаційного кадру на основі Wi-Fi. Як відомо [214], в стандарті застосовується технологія множинного доступу із контролем несучої та виявленням колізій CSMA/CD, що передбачає виконання функцій центра

розповсюдження і створення централізованого доступу до частотного ресурсу радіоканалу для всіх абонентів. Для передачі інформаційного кадру використовується цикл RTS/CTS однонаправленого сеансу. Він починається із створення запиту на дозвіл передачі із формуванням кадру RTS. При його отриманні, в зворотному напрямку, формується кадр підтвердження на готовність прийому (CTS). Потім виконується передача інформаційного кадру, при його вдалому прийомі, в зворотному напрямку формується кадр підтвердження АСК. В цей час, будь-які інші приймачі у мережі, що отримали RTS кадр, залишаються в режимі прослуховування без трансляцій кадрів, для уникнення колізій. Якщо прийом не був виконаний успішно, то передача інформаційного кадру здійснюється повторно.

Довжина RTS/CTS циклу задається на MAC підрівні у заголовку інформаційного кадру, де існує поле мережного вектора розміщення довжиною 16 біт. Таке число вказує на довжину циклу передачі і є еквівалентом часового інтервалу, на який резервується ресурс радіоканалу для передачі інформаційного кадру. Цей часовий інтервал еквівалентний часу передачі кадру АСК та одного короткого захисного інтервалу (10 мкс для каналів в діапазоні 2,4 ГГц, 16 мкс для каналів в діапазоні 5 ГГц) і становить 44 мкс.

Розглянемо кількість інформації, що передається під час циклу RTS/CTS. Структура службових кадрів наведена на рис. 1.8.

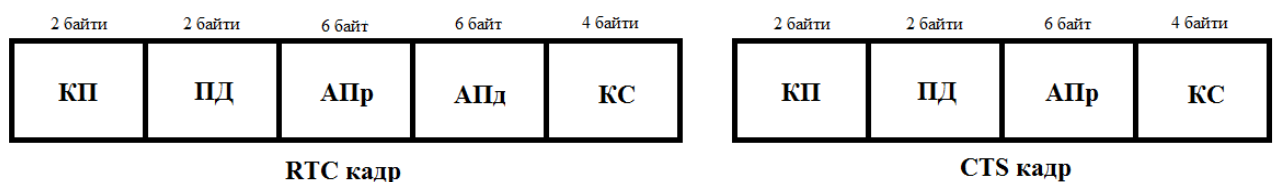


Рис. 1.8. Структура RTS та CTS кадрів

Довжина кадру RTS становить 20 байт службової інформації. Він складається із керуючого поля (КП); поля довжини (ПД), яке містить число еквівалентне часовому інтервалу, необхідного для передачі інформаційного кадру; адреси

приймача (АПр), для якого формується передача; адреси передавача (АПд) та контрольної суми (КС). При створенні CTS кадру адреса передавача копіюється у поле адреси приймача і загальна довжина кадру становить 14 байт.

Для передачі пакетів, стандарт Wi-Fi передбачає формування власних типів кадрів [214]. Ці кадри формуються на каналному та фізичному рівні. Із верхніх рівнів пакет сформований протоколами верхніх рівнів формується у сервісний пакет даних або кадр MSDU. Потім на каналному MAC підрівні формується кадр MPDU, який містить в собі службову інформацію для ідентифікації пакетів MSDU. Кадр додатково містить циклічний надлишковий код для перевірки правильності передачі. Структура кадру для стандарту Wi-Fi наведено на рис. 1.9.

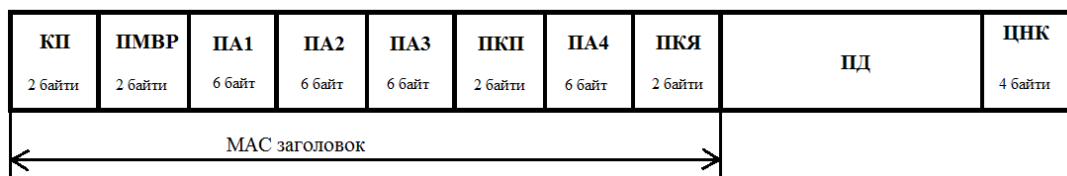


Рис. 1.9. Структура кадру MPDU

В наведеній побудові кадру на рис. 1.9, можна виділити три головних частини: MAC заголовок, поле даних (ПД) та поле циклічного надлишкового коду (ЦНК). Заголовок приймає участь у операціях передачі інформації, яка міститься у полі даних від одного Wi-Fi інтерфейсу до іншого. Перше поле заголовку є керуючим (КП) та містить в собі службову інформацію про: версію протоколу, функцію кадру, вхідний чи вихідний кадр, встановлення шифрування, керування потужністю.

Поле мережного вектора розміщення (ПМВР) виконує головну функцію по керуванню лічильником часових інтервалів для станцій, які очікують прийом пакетів. Це в свою чергу забезпечує роботу технології множинного доступу із контролем несучої та виявлення колізій (CSMA/CD). Вона забезпечує гнучке керування передачею трафіку при існуванні в середовищі множини точок

доступу, і при співпадінні на одному частотному діапазоні декількох випромінюючих станцій, передача буде зберігатись без розривів сеансів передачі у радіоканалах. Але при цьому, ефективна пропускна здатність зменшиться за рахунок збільшення часових інтервалів між передачею кадрів MPDU.

Поле адресації (ПА) містить в собі унікальну адресу приймаючої станції, для створення індивідуального радіоканалу, або адресу для створення точки доступу у мережі для підключення локальних абонентів. Виключенням є ПА4, яке є адресною інформацією, для побудови системи розподілу безпроводних мереж, на основі взаємодії точок доступу за допомогою радіоканалів (створення радіо подовжувачів мережі та ретрансляторів).

Поле керування послідовністю (ПКП) – використовується приймальною станцією для визначення дубльованих пакетів при передачі, а також для поділу на частини кадру MSDU.

Поле контролю якості (ПКЯ) визначає параметри для сервісу контролю якості QoS. Наявність цього поля є необов'язковим і використовується при наявності доступу до інфокомунікаційних послуг, що має вісім рівнів пріоритету.

Поле даних (ПД) має змінну довжину та поділяється на 15 видів в залежності від типу інформації, яка передається. В загальному, довжину поля даних можна записати наступним виразом:

$$l_{in} = 2048 + 256 + \begin{cases} 8(WEP); \\ 20(TKIP, WPA1); \text{ [байт]} \\ 16(CCMP, WPA2). \end{cases} \quad (1.7)$$

де 2048 – довжина інформаційного пакету для сумісності додатків верхніх рівнів; 256 – максимальна довжина заголовків для протоколів верхніх рівнів. Інші байти призначені для відповідних алгоритмів шифрування.

Кадр підтвердження АСК, відповідно до структури кадру CTS, має аналогічну побудову довжиною 14 байт. Враховуючи вище сказане та існування захисних інтервалів між кадрами, кількість інформації, що передається за один

RTS/CTS цикл PPDU кадру через радіоканали корпоративних телекомунікаційних мереж, можна представити як показано на рис. 1.10.

RTS кадр 20 байт	ЗІ 10 мкс (16 мкс)	CTS кадр 14 байт	ЗІ 10 мкс (16 мкс)	PPDU кадр 2304 + 15 (24) байт	ЗІ 10 мкс (16 мкс)	ACK кадр 14 байт
----------------------------	---------------------------------	----------------------------	---------------------------------	---	---------------------------------	----------------------------

Рис. 1.10. Цикл передачі інформаційного кадру

Таким чином, каналний рівень додає 40 байт службової інформації, а фізичний рівень – послідовність довжиною 40 байт для низькошвидкісного режиму, 64 байт для високошвидкісного та 104 байти для суміщеного.

Таким чином, оцінювання пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж є досить складним процесом, що потребує вирішення завдань розроблення методів і моделей визначення та оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на основі поєднання методів моніторингу та статистичного аналізу.

1.4 Проблематика досліджень та постановка завдань оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів

Широке впровадження радіотехнологій 5G/Wi-Fi при розгортанні телекомунікаційних корпоративних мереж, має суттєві недоліки, що пов'язані з виникненням ряду негативних факторів, які зменшують ефективність радіоканалів і сприяють появі затримок та помилок під час сеансів передачі трафіку, що приводить до інформаційних втрат. При побудові мереж радіодоступу на основі технологій 5G/Wi-Fi, в першу чергу, необхідно забезпечити високу пропускну здатність радіоканалів для кожного окремого абонента, пристроїв IoT, а також забезпечити високу якість обслуговування. При розгортанні мереж у приміщеннях, необхідно вирішувати ряд проблем, таких як: обмеження енергетичного та спектрального ресурсів, вплив інтерференційних завад (сусідні

мережі, mesh-мережі, піко- і нанокомірки 4G/5G), вплив параметрів приміщень та внутрішніх об'єктів (архітектурні перешкоди та багатопрорізне поширення хвиль), електромагнітна сумісність, існування статичних та випадкових факторів впливу, розмір інвестицій. Як правило, у мережах 5G/Wi-Fi такі проблеми частково вирішуються за допомогою методів програмно-конфігурованого керування ресурсами мережі, зменшенням розміру комірок та збільшенням їх щільності, а також покращенням параметрів каналного і фізичного рівнів радіодоступу. Але такі методи на пряму залежать від точності та інформативності вхідних параметрів, які отримуються на основі методів та засобів моніторингу, мережної аналітики та оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів в реальних умовах експлуатації. Як було встановлено, під час аналізу існуючих наукових праць, на сьогодні, універсальна система оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів із врахуванням максимально-можливої кількості факторів впливу та врахуванням параметрів корпоративних приміщень, є відсутньою, що створює проблему. Для вирішення такої проблеми, є актуальним, розроблення універсальної методології оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж з метою отримання оптимальних технічних показників для досягнення максимально можливої пропускної здатності і при мінімальних інформаційних втратах для мереж радіодоступу 5G/Wi-Fi.

Для створення методології, в першу чергу, було досліджено та проаналізовано існуючі підходи до моделювання радіоканалів, а також роботу радіоканалів в реальних умовах приміщень при існуванні різного роду факторів впливу. Для цього використовувались корпоративні мережі із різноманітними конфігураціями і параметрами приміщень та аналіз інформації про роботу мережі в цілому, за допомогою підходів оцінювання, моніторингу та контролю. Аналіз виявив, що: існуючі моделі затухання сигналів потребують точного задання початкових коефіцієнтів затухання; врахування значної кількості параметрів та характеризуються складністю розрахунків; можливості існуючих моделей оцінювання радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж є

обмеженими, оскільки використовують параметри, які описані в технічних специфікаціях і дають результат математичного очікування, що має значну похибку із параметрами в реальних умовах роботи; відсутність механізму зв'язку факторів впливу, які існують у приміщеннях, із параметрами радіоканалів, для врахування їх дії, як окремо, так і комплексно та ін.

Для вирішення вказаних недоліків, розглянемо особливості вимірювання основних параметрів радіоканалів на основі програмно-апаратних засобів моніторингу. Як зазначалось, основними параметрами є: потужність сигналу на вході приймача (P_m); пропускна здатність (V_{pl}) та ефективна швидкість передачі інформації (V_{eff}). З точки зору експериментальних досліджень та їх статистичної обробки, загальну модель оцінювання параметрів радіоканалів можна записати так [83]:

$$\begin{cases} V_{eff} = F_1(l), \\ V_{pl} = F_2(l), \\ P_m = F_3(l). \end{cases} \quad (1.8)$$

де $F_1(l)$, $F_2(l)$, $F_3(l)$ – функції залежності основних параметрів від довжини радіоканалу; l – довжина радіоканалу або радіокола.

Потужність сигналу можна вимірювати за допомогою програмно-апаратних засобів абонентських пристроїв та програмних додатків [139–140]. Проаналізуємо проблему оцінювання основних параметрів радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж на основі експериментальних досліджень у приміщенні для стандарту Wi-Fi. Для цього, використано методику досліджень на основі структури, яка показана на рис. 1.11.

Мережа містить точку доступу (ТД) та абонентський пристрій (АП) з'єднаний із сервером зберігання даних (С) за допомогою прямого та зворотного радіоканалів для передачі інформації. Дослідження проведено у приміщенні де відстань між передавачем та приймачем досягала 16-ти метрів. Між ТД та АП,

крім прямої видимості, вносились дві архітектурні перешкоди на відстані $l_1 = 4\text{ м}$, та $l_2 = 6\text{ м}$ від ТД. Створення фактору впливу інтерференційних завад виконано за допомогою інтерференційних ТД.

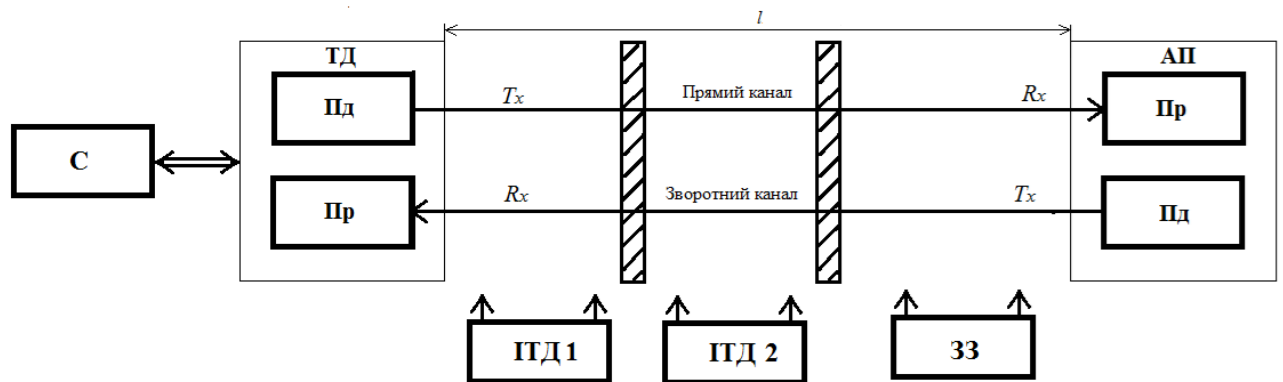
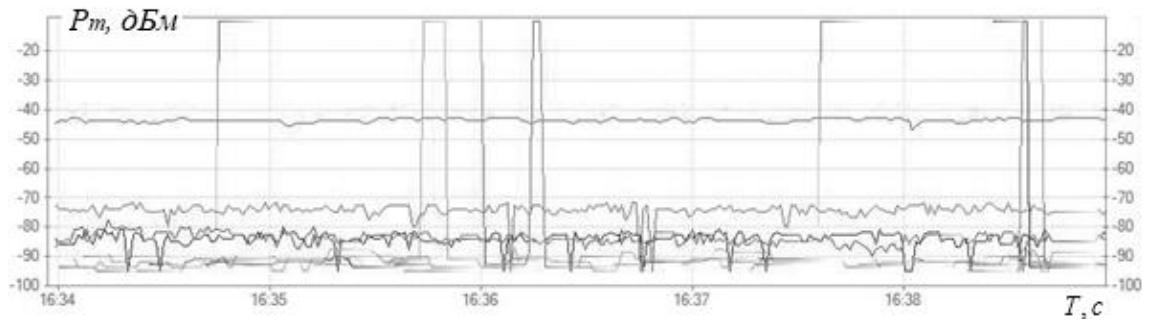


Рис. 1.11. Структура мережі для дослідження параметрів радіоканалу

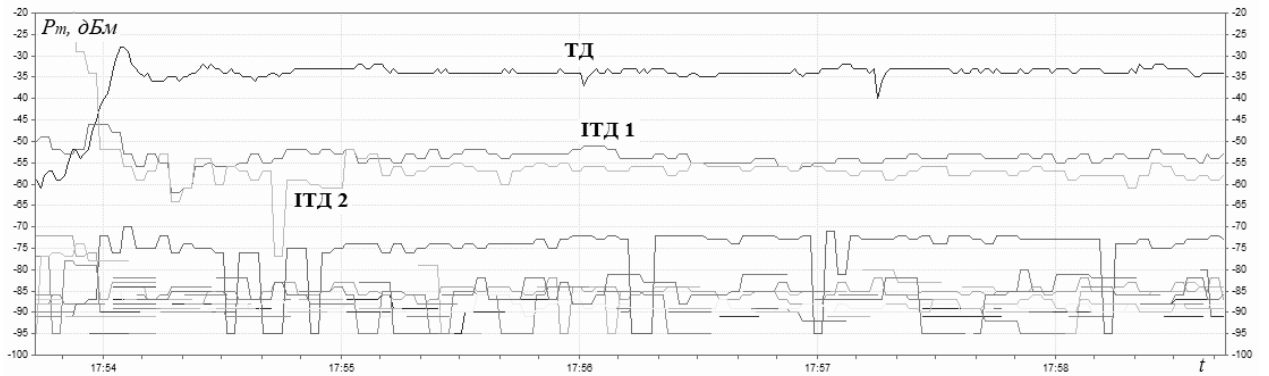
Розглянемо результати моніторингу потужності сигналу на вході приймача, фрагмент якого наведено на рис. 1.12.

Інтерференційні завади доцільніше аналізувати на основі моніторингу спектра сигналів. Запропонована структура мережі дозволяє розглядати два випадки. Перший з них, полягає у створенні частотного каналу без інтерференційних завад. Другий – перетин головної пелюстки спектра досліджуваного частотного каналу із інтерференційним [112], використовуючи інтерференційну точку доступу (ІТД). Спектр частотних каналів наведено на рис. 1.13.

Результати моніторингу наведено для радіоканалів із смугою 20 МГц та 40 МГц стандарту 802.11n, та частотного діапазону 2,4 ГГц. Суміщений та сусідній інтерференційні канали створено ІТД1 і ІТД2 [109, 112]. Аналогічні результати можна отримати і для інших стандартів [80, 81, 82]. Додатково в спектрі присутня значна кількість зовнішніх завад (ЗЗ) із низьким рівнем випромінювання, які перетинають головну пелюстку спектра.

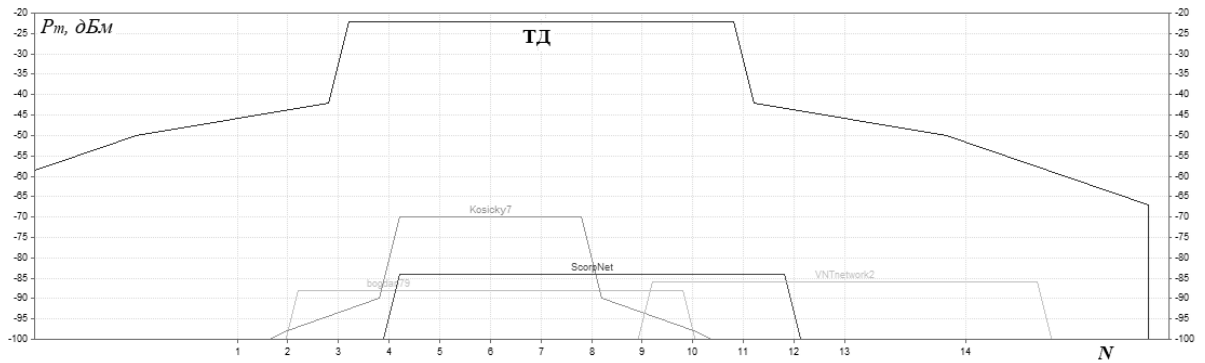


а)

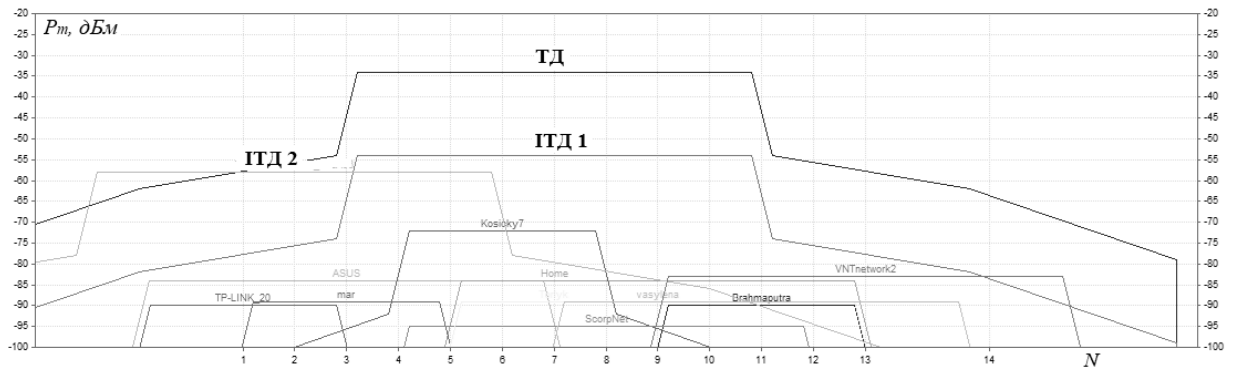


б)

Рис. 1.12. Часовий розподіл потужності сигналу на вході приймача із низьким рівнем інтерференційних завад (а) та високим (б)



а)



б)

Рис. 1.13. Спектр частотних каналів із низьким рівнем інтерференційних завад (а) та високим (б)

Враховуючи довжину радіоканалу як параметр, отримано наступні залежності для аналізу впливу архітектурних перешкоди. Результати досліджень наведено на рис. 1.14.

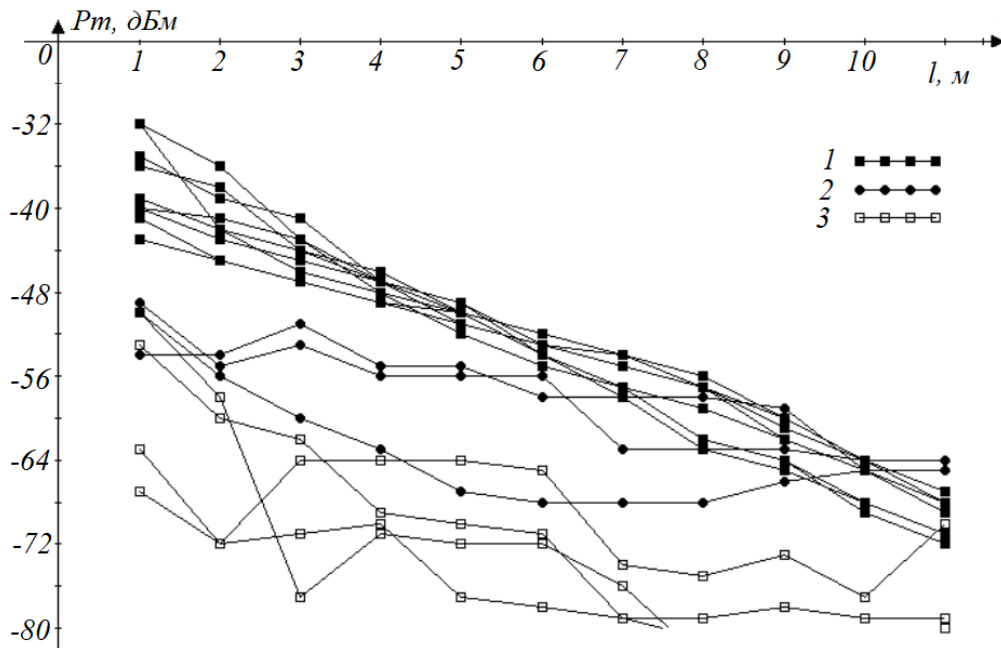


Рис. 1.14. Залежність потужності сигналу на вході приймача від довжини радіоканалу (1 – для прямої видимості, 2 – канал із перешкодами «дерево», 3 – канал із перешкодами «цегла»)

На графіках наведено усереднені результати для точок доступу та абонентських пристроїв різних виробників і частотних каналів 20 МГц, 40 МГц і 80 МГц.

При існуванні перешкод типу «дерево», на відстані близько 10-12 м від передавача спостерігаються виражені флуктуації, що перевищує значення для прямої видимості. Відносно перешкод типу «цегла», то тут результати очікуванні – високий коефіцієнт згасання. Таким чином, рівень потужності сигналу на вході приймача має виражені флуктуації із-за багатопроменевого поширення хвиль, рівень яких залежить від типу архітектурних перешкод та кількості відбиваючих поверхонь [84, 86].

Отримані результати є подібними із результатами радіоканалів інших стандартів, як для діапазону 2,4 ГГц, так і для 5 ГГц, та будуть розглянуті в наступних розділах.

Отже, аналіз показав, що на основі вимірювання параметра потужності сигналу на вході приймача можна визначати рівень затухання сигналу в середовищі, величину флуктуацій, що пов'язані із дією параметрів приміщення, дію інтерференційних завад і шумів, затухання сигналу при проходженні через архітектурні перешкоди та ін.

В якості інформаційного параметра запропоновано використовувати ефективну швидкість передачі інформації V_{eff} , як для каналу прийому (зворотного), так і для каналу передачі (прямого), який залежить від відстані між передавачем та приймачем l [81]. Пропонується оцінювати такий параметр, на основі моніторингу кількості переданих N^{Tx}_{MSDU} та прийнятих кадрів N^{Rx}_{MSDU} .

При створенні сеансів передачі кадрів, ефективну швидкість передачі інформації можна визначити за наступним виразом:

$$V_{eff} = \frac{U_e - U_c}{t}, \quad (1.9)$$

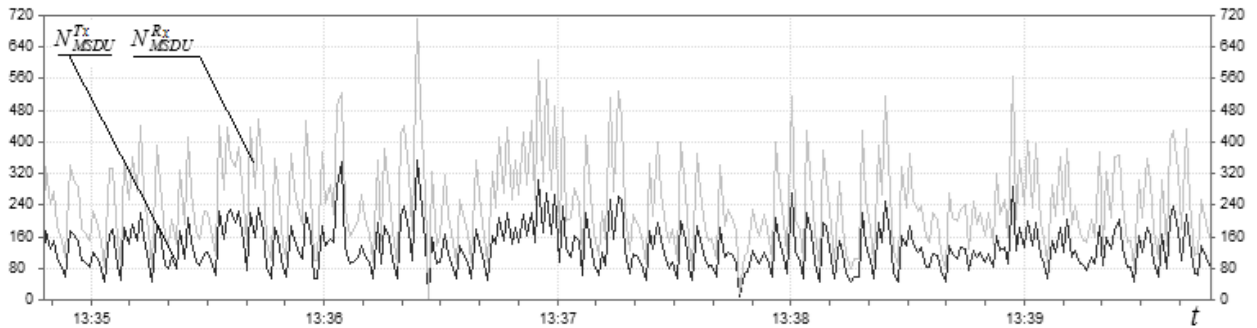
де U_{eff} та U_c – об'єм переданої ефективною та службовою інформації за одиницю часу t .

Якщо, враховувати що корисна інформація міститься у кадрах MSDU, то визначити швидкість передачі V^{Tx}_{eff} та прийому V^{Rx}_{eff} можна по кількості вдало переданих та отриманих кадрів. Для цього, використаємо параметри N^{Tx}_{MSDU} та N^{Rx}_{MSDU} . Таким чином, отримаємо:

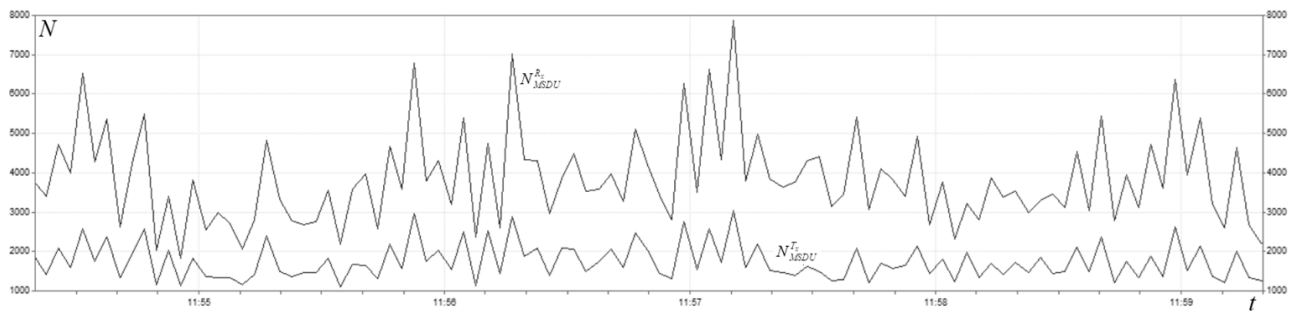
$$V^{Tx}_{eff} = \frac{N^{Tx}_{MSDU} \cdot L_k}{t}, \quad V^{Rx}_{eff} = \frac{N^{Rx}_{MSDU} \cdot L_k}{t}, \quad (1.10)$$

де L_k – довжина кадру MSDU в бітах або байтах.

Враховуючи, що один цикл моніторингу має довжину одна секунда, та встановивши постійну швидкість передачі інформації у радіоканалі, можна отримати часовий розподіл параметрів N_{MSDU}^{Tx} та N_{MSDU}^{Rx} . Як приклад, фрагменти моніторингу для стандартів 802.11g та 802.11ac, наведено на рис. 1.15.



а)



б)

Рис. 1.15. Фрагмент розподілу кількості переданих та прийнятих кадрів MSDU у часі для стандарту 802.11g (а) та 802.11ac (б)

Часові характеристики прийому та передачі кадрів PPDU співпадають із розподілом MSDU кадрів. Різниця спостерігається у кількості самих пакетів, тому графік кількості переданих та отриманих кадрів N_{MPDU}^{Tx} та N_{MPDU}^{Rx} на каналному рівні є такою ж самою. Аналогічно, можна говорити про параметр N_{NIC}^{Rx} , який повторює форму часового розподілу прийнятих пакетів. Тому, для подальшого аналізу його можна не враховувати.

Наступна характеристика, яка представляє інтерес, це часовий розподіл кількості виявлених помилок при передачі інформаційних полів протоколу цілісного часового ключа N_{TKIP} . Приклад такого розподілу наведено на рис. 1.16.

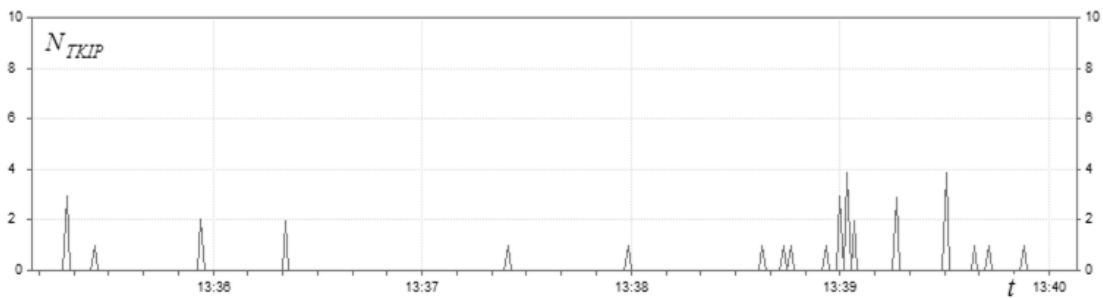


Рис. 1.16. Фрагмент розподілу кількості помилок протоколу ТКІР у часі

Для параметра N^{NIC}_{fail} часовий розподіл повністю відповідає розподілу на рис. 1.16, в результаті чого його теж можна не враховувати.

Після перетворення бітової послідовності у кадри, проводиться перевірка їх на цілісність та, при існуванні помилок, виконуються функції по виправленню. Якщо кількість помилок є високою, то кадр вважається непридатним і виконується запит на його повторну передачу [80].

Чим більше в середовищі завад і перешкод, тим більша кількість непридатних кадрів надходить на приймач. Для оцінювання непридатних кадрів, існують лічильники кількості повторних запитів та лічильники кількості втрачених кадрів при перевищенні дозволеного періоду повторних запитів.

Кількість перезапитів на повторну передачу кадру поділяються на два види: лічильник кількості вдало переданих кадрів, при повторній передачі N_r та лічильник кількості вдало переданих кадрів, для яких було виконано більше ніж один повторний запит $N_{m.r}$. Приклади часових розподілів для вказаних параметрів показано на рис. 1.17.

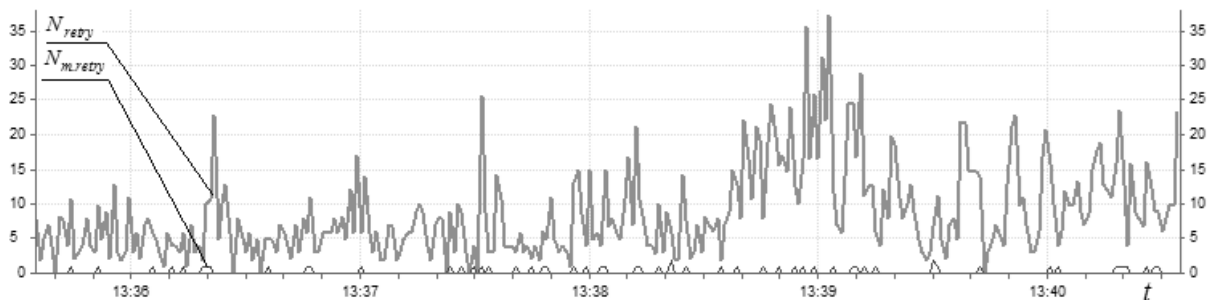


Рис. 1.17. Часовий розподіл кількості вдало переданих кадрів MSDU для циклів повторної передачі

Середньостатистичну кількість вдало переданих кадрів із циклом повторної передачі за період спостереження, можна розрахувати так:

$$N_r = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T N_r^i, \quad i = 1, 2, 3..T. \quad (1.11)$$

Кількість вдало переданих кадрів при повторних циклах $N_{m,r}$, є значно меншим, і на графіках існують часові проміжки з нульовим рівнем, тому, для оцінювання такого часового розподілу запропоновано використовувати нормоване значення – загальна кількість пакетів на період спостереження:

$$N_{m,r} = \sum_{i=1}^T N_{m,r}^i, \quad i = 1, 2, 3..T. \quad (1.12)$$

Кількість втрачених пакетів, при сеансах передачі N_f , є одним із головних параметрів, і має найбільше відношення до визначення кількості факторів впливу у радіоканалі. Фрагмент часового розподілу для кількості втрачених пакетів на каналному рівні показано на рис. 1.18.

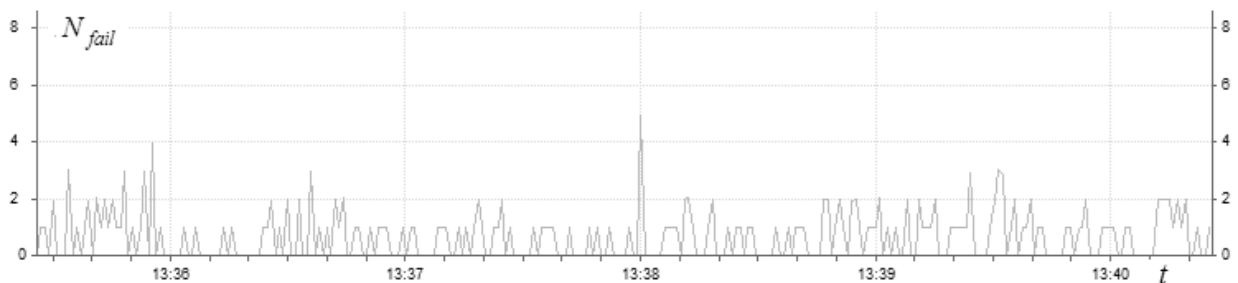


Рис. 1.18. Часовий розподіл кількості втрачених пакетів при передачі

Аналогічно виразу 1.11, середньостатистична кількість втрачених кадрів складе:

$$N_f = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T N_f^i, \quad i=1,2,3..T. \quad (1.13)$$

Наступний параметр пов'язаний із появою на приймальному пристрої дублюючих кадрів. Такі кадри виникають при неспівпадінні часових інтервалів передачі та прийому, які з'являються внаслідок дії завад у радіоканалі. Тоді доцільно, використовувати лічильник кількості прийнятих дублюючих кадрів, яким присвоєно відповідний атрибут. Часовий розподіл кількості таких кадрів N_d показано на рис. 1.19.

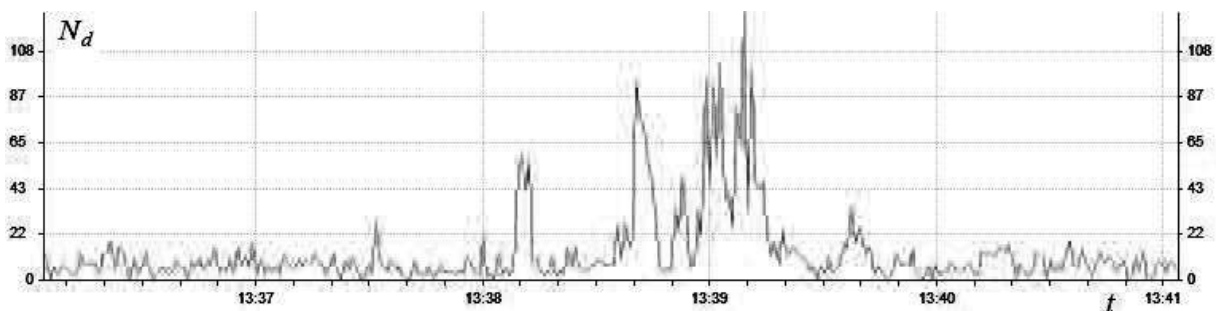


Рис. 1.19. Часовий розподіл кількості прийнятих кадрів помічених як дублюючі

Як видно із рис. 1.19, на графіку спостерігається значне збільшення кількості дублюючих кадрів в часовому інтервалі (13:38; 13:40). Таке ж саме явище спостерігається із кількістю вдало повторно переданих кадрів на рис. 1.17 та збільшення кількості помилок на рис. 1.18, що говорить про появу фактору впливу випадкового характеру. При цьому, середнє значення кількості переданих та прийнятих кадрів MSDU залишається сталим.

Далі розглянемо параметри, які контролюють якість передачі кадрів у радіоканалі N_{ACK} та N_{FCS} . В контрольному полі MAC заголовку існує біт повтору. Якщо він встановлений в «0», то виконується звичайна передача кадру. Коли біт встановлений у «1», то це вказує що кадр був надісланий повторно. При успішній передачі кадру, приймач надсилає кадр підтвердження АСК передавальному пристрою. Це відбувається за умови, що перевірна контрольна сума поля FCS у

кадрі MSDU немає помилок. Якщо, частина кадру є втраченою, то контрольна сума повертає помилку й приймальний пристрій не формує кадр АСК, а передавач, не отримавши підтвердження, виконує повторну передачу. Це справедливо тільки для сеансів індивідуальної передачі.

Для прикладу, розглянемо часові розподіли параметрів N_{FCS} та N_{ACK} , для умови прямої видимості та радіоканалу шириною 20 МГц, які наведено на рис. 1.20.

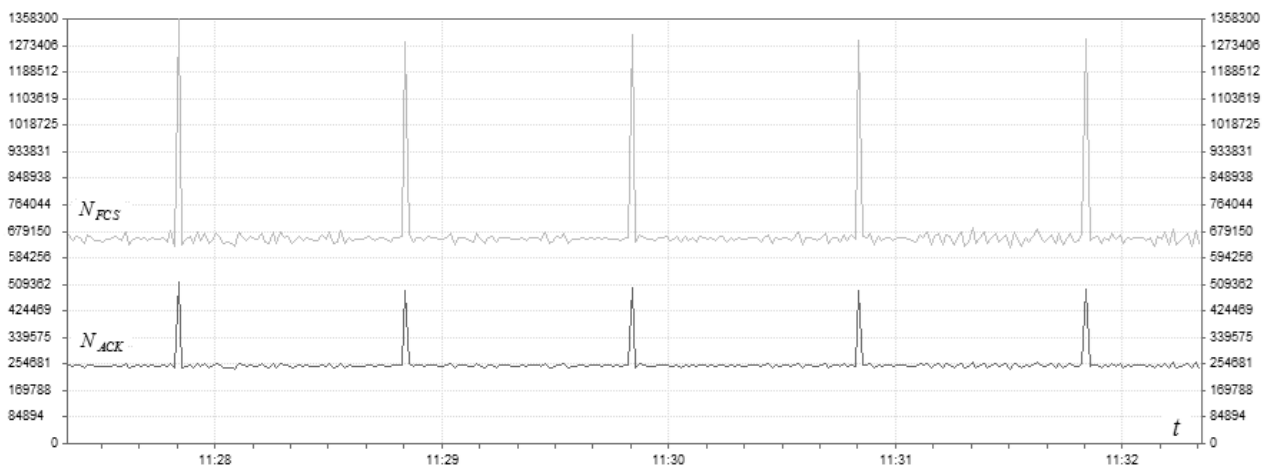
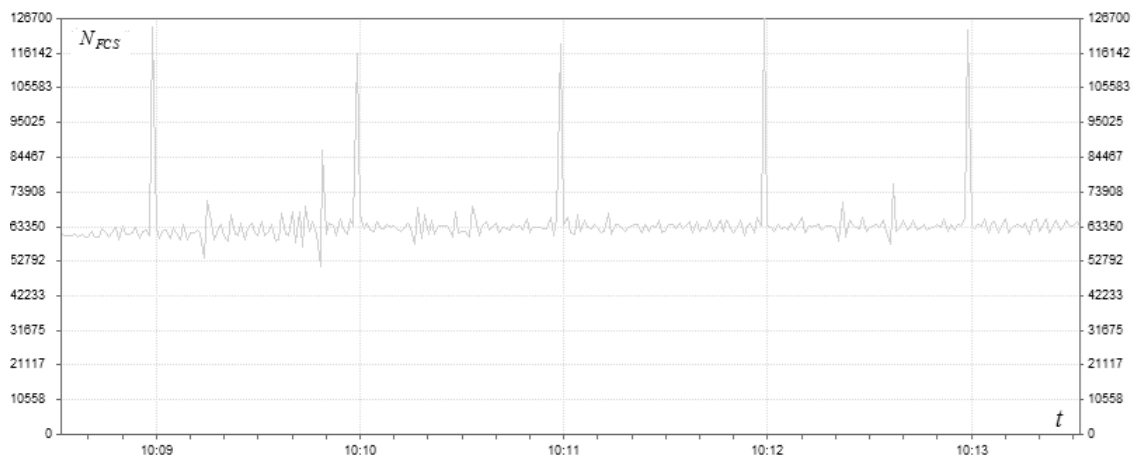


Рис. 1.20. Часовий розподіл для параметрів N_{ACK} та N_{FCS}

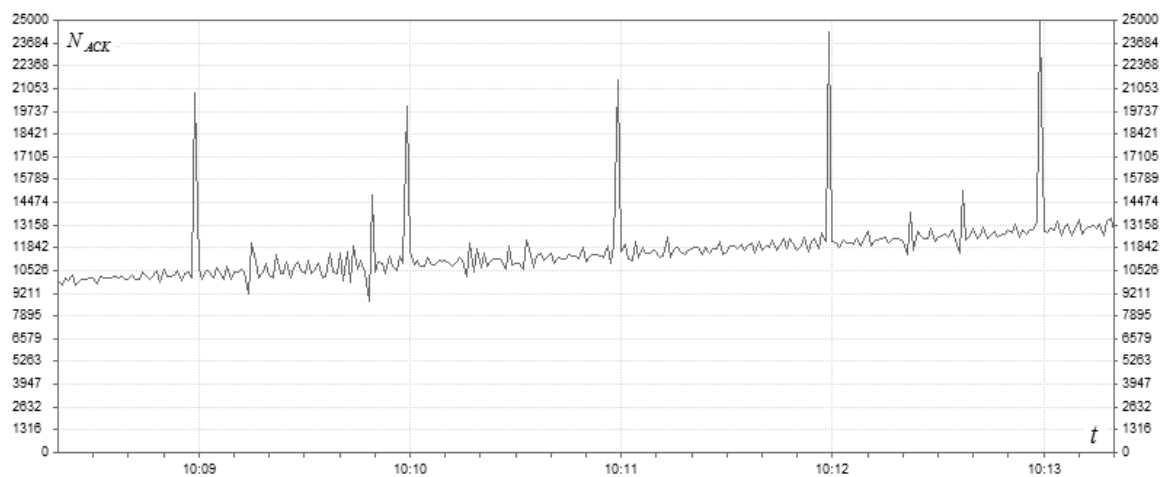
Як видно із рис. 1.20, часовий розподіл параметрів N_{FCS} та N_{ACK} є складним та потребує високих об'ємів обчислень. Значення лічильників мають характер зростання у часі з моменту початку передачі кадрів у радіоканалі. Однак, при використанні радіоканалів шириною 40 МГц, нерівномірність часових характеристик для цих параметрів зростає, як показано на рис. 1.21 і рис. 1.22.

Як видно із рис. 1.21 і рис. 1.22, поява в радіоканалі інтерференційних завад та архітектурних перешкод збільшує нерівномірність часових характеристик. Це означає, що радіоканали із більшою смугою частот є досить чутливими до зміни параметрів середовища передачі [113].

Під час досліджень встановлено, що абонентський пристрій виконує передачу до точки доступу кадри для режиму багато-спрямованої передачі Multicast, навіть при створенні індивідуальної передачі між абонентом та точкою доступу. Тому, додатково дослідимо режим багато-спрямованої передачі.



а)



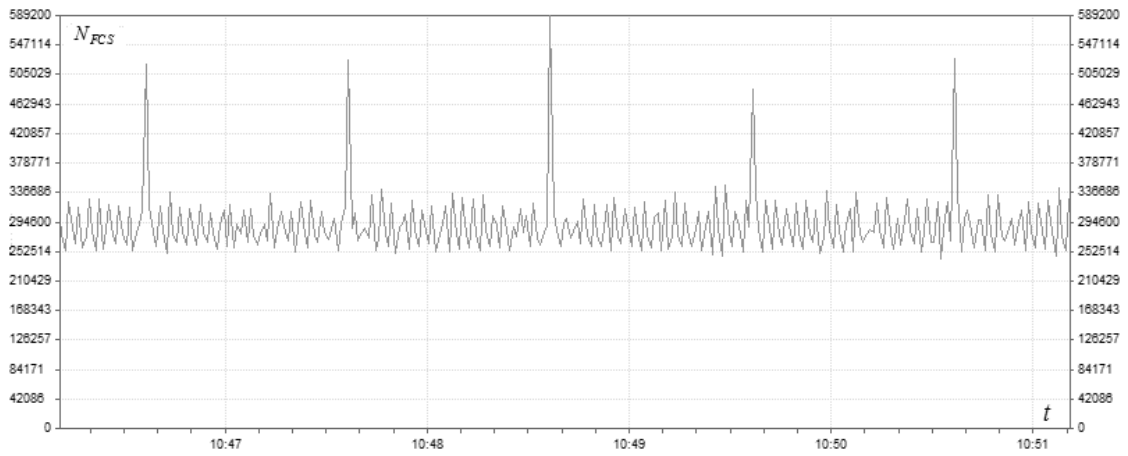
б)

Рис. 1.21. Часовий розподіл для параметрів N_{FCS} (а) та N_{ACK} (б) радіоканалу зі смугою 40 МГц без завад і перешкод

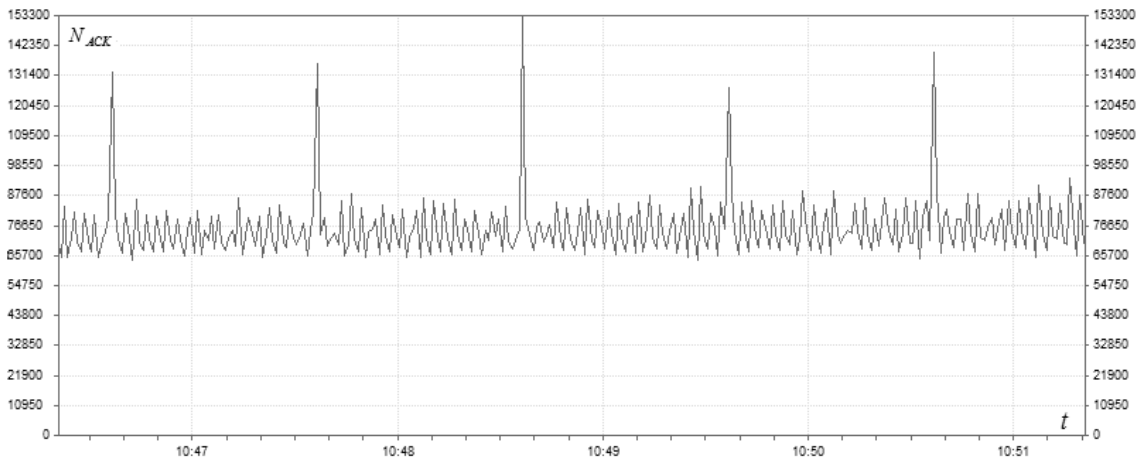
Часовий розподіл кількості переданих кадрів для Multicast із атрибутом N_{Mcast}^{Tx} наведено на рис. 1.23.

В деякі проміжки часу існував прийом кадрів від інших точок доступу, фрагмент часового розподілу із атрибутами Multicast N_{Mcast}^{Rx} наведено на рис. 1.24.

Аналіз часового розподілу багато-спрямованого режиму передачі, показав, що кількість відправлених кадрів завжди залишалась постійною. Тому, даний вид параметрів для досліджень характеристик радіоканалу не є інформативним та автоматично враховується при оцінюванні ефективної швидкості передачі інформації.



а)



б)

Рис. 1.22. Часовий розподіл для параметрів N_{FCS} (а) та N_{ACK} (б) радіоканалу зі смугою 40 МГц із завадами та перешкодами

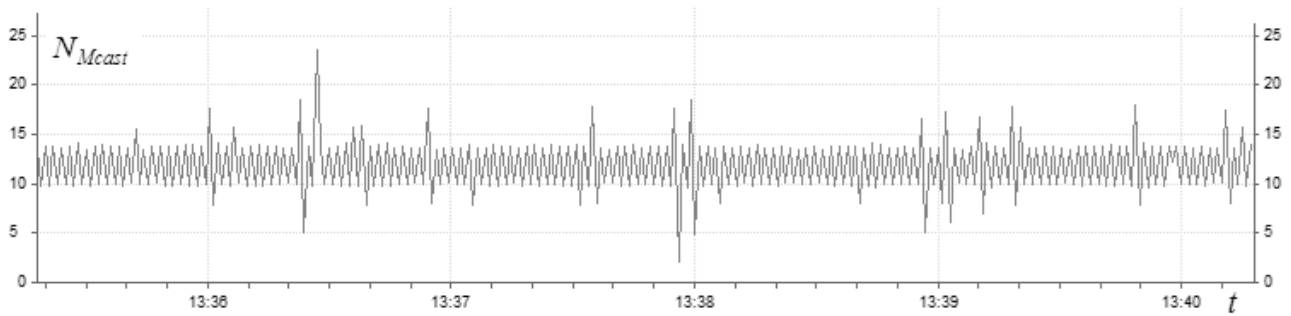


Рис. 1.23. Часовий розподіл вдало переданих кадрів MSDU для багато-спрямованого режиму передачі

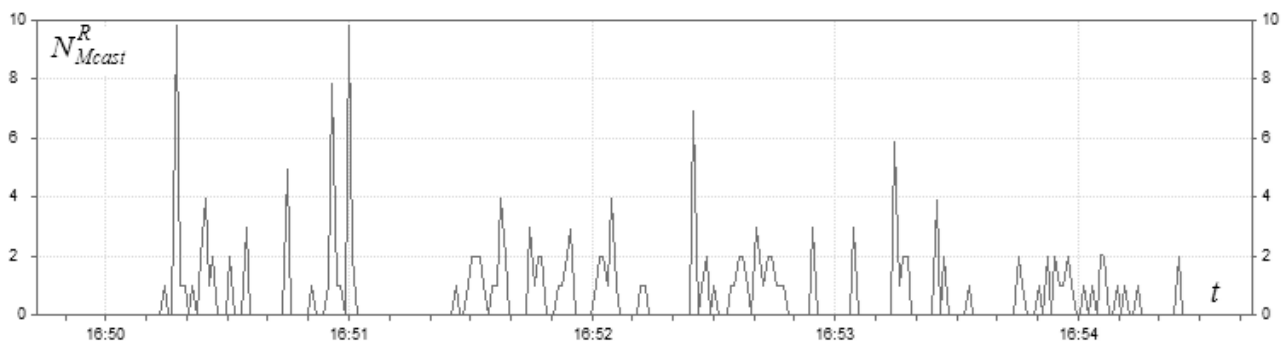


Рис. 1.24. Часовий розподіл вдало прийнятих кадрів для багато-спрямованого режиму передачі

Аналіз отриманих результатів досліджень показав, залежність основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж від різного роду факторів впливу. Всі часові характеристики мають випадковий характер із вираженими флуктуаціями, що передбачає складність процесу оцінювання. Тому, для розроблення ефективних методів оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж, на основі радіотехнологій доступу 5G/Wi-Fi, необхідно зробити узагальнення на основі моделі, яка повинна забезпечити формалізований опис об'єкта, необхідний для вирішення поставленої у роботі науково-прикладної проблеми. Згідно з [254], узагальнену модель оцінювання можна представити в наступних формах: аналітична, таблична, векторна, структурно-наслідкова та ін. Кожна з таких моделей має низку переваг та недоліків, але вони повинні визначати стан об'єкта, що задовольняє всім технічним вимогам та всі інші стани, що не задовольняють таким вимогам. Така постановка дозволяє здійснювати аналіз та оцінювання об'єкта теоретичними та експериментальними методами на етапах проектування та оптимізації мереж, враховуючи вплив зовнішніх факторів. Крім того, модель повинна забезпечити можливість визначати зв'язок між технічним станом об'єкта та його станом під час експлуатації.

Тоді, враховуючи структуру у роботі [101], енергетичні та інформаційні параметри, запропоновано структурну модель мережі радіодоступу 5G/Wi-Fi з урахуванням дії факторів впливу, яку можна представити як на рис. 1.25.

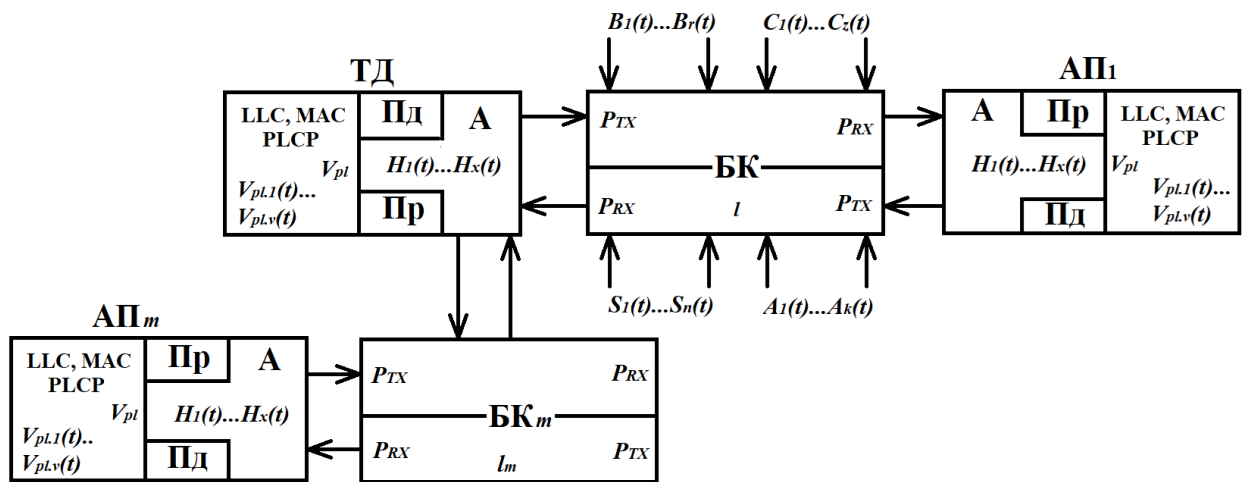


Рис. 1.25. Структурна модель побудови мережі для оцінювання параметрів радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж

Як засіб вимірювання вхідних параметрів використовується приймальний пристрій (абонентський) (АП), за допомогою якого, виконується радіомоніторинг де основним параметром є потужність сигналу на вході приймача (P_{RX}). На нього діє значна кількість факторів впливу як зовнішніх, так і внутрішніх. Ці фактори можна поділити на групи за характером впливу: $A(t)$ – шумові завади; $S(t)$ – інтерференційні завади; $B(t)$ – характеристики затухання сигналу, що обумовлені поширенням хвиль у просторі (перешкоди, багатопроменеве поширення хвиль, дифракція та ін.); $C(t)$ – затухання сигналу пов’язане із випадковими факторами, що можуть з’являтися у певні проміжки часу; $H(t)$ – характеристики внутрішніх параметрів приймально-передавального обладнання підрівня PMD (коефіцієнт підсилення, діаграма спрямованості, додаткові радіотехнології, чутливість та ін.).

Пропускна здатність (V_{pl}) визначається кількістю отриманої та переданої інформації через радіоканал. Як правило, такий параметр встановлюється за допомогою схеми MCS на основі вбудованих алгоритмів радіомоніторингу [214]. З точки зору додатків прикладного рівня, кількість корисної інформації є значно меншою чим показує параметр V_{pl} [84]. Тому, доцільно оцінювати пропускну здатність як ефективну швидкість передавання інформації (V_{eff}), що є реальним інформаційним показником радіоканалу та забезпечує роботу всіх додатків

прикладного рівня. Параметр V_{eff} залежить від головного енергетичного параметра і дії факторів впливу $V_{pl.v}(t)$ на параметр V_{pl} .

Таким чином, встановлено, що для розроблення методів та моделей оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж головною проблемою є вибір вхідних параметрів із врахуванням взаємозв'язків між ними в умовах низького рівня випромінювання сучасних мереж радіодоступу 5G/Wi-Fi, складної картини поширення радіохвиль у приміщеннях та існування статичних та випадкових факторів впливу.

Враховуючи аналіз наведених вище аспектів та структурну модель на рис. 1.25, запропоновано структурно-логічну схему дисертаційного дослідження, на основі якої, вирішується поставлена у роботі науково-прикладна проблема розроблення нової методології підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж, яка показана на рис. 1.26.

Корпоративна телекомунікаційна мережа складається із радіоканалів, як найменших структурних одиниць. Радіоканал містить у собі дві структурні складові, каналний та фізичний рівні, що і визначає вибір параметрів. Процес оцінювання можна поділити на дві частини: загальну та розширену. До загального оцінювання можна віднести дослідження основних параметрів радіоканалу, як вимірювальні значення P_m і V_m , на основі програмно-апаратних засобів моніторингу. Моніторинг можна виконувати на широкому спектрі пристроїв, враховуючи абонентські приймачі, приймачі ТД, спеціалізоване обладнання та використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення. Розширений процес оцінювання передбачає аналіз супроводжуваних параметрів та факторів впливу, що залежить від можливостей засобів моніторингу.

Метою роботи є підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж, тому методологія розробляється для покращення технічних показників корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах початкової та неперервної оптимізації, для забезпечення початкових вимог.

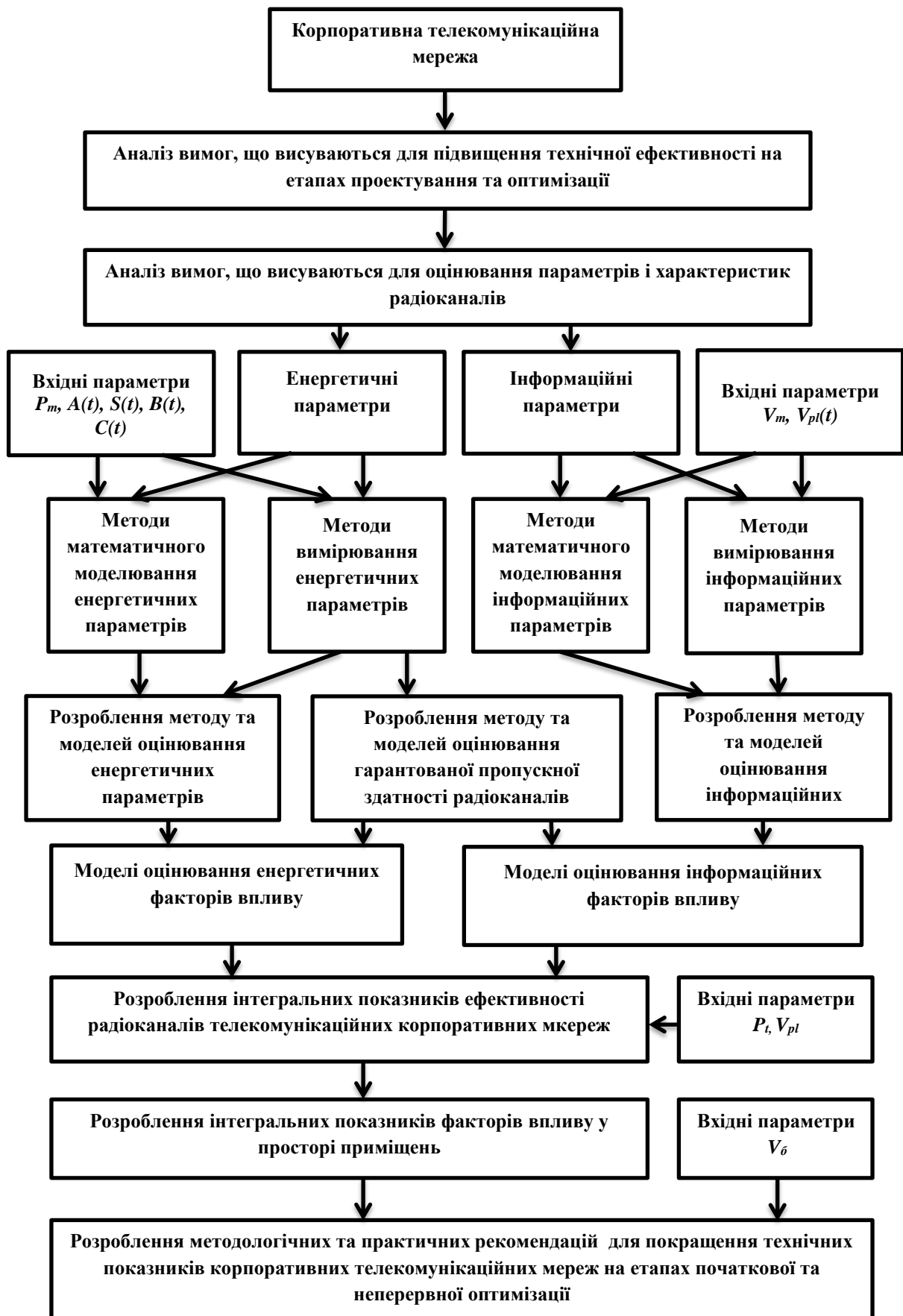


Рис. 1.26. Структурно-логічна схема дисертаційного дослідження

До енергетичних параметрів можна віднести: потужність випромінювання передавача P_{TX} , потужність сигналу на вході приймача P_{RX} , коефіцієнт шуму, коефіцієнт інтерференції, діапазон частот, смуга каналу, чутливість та ін. Інформаційні параметри існують у радіоканалі на етапі перетворення бітової швидкості у кадри [226] та визначаються підрівнями PLCP (пропускна здатність V_{pl}) і каналним рівнем (підрівні MAC, LCC) разом із додатками прикладного рівня (ефективна швидкість передачі інформації V_{eff}). Розширеним оцінюванням інформаційних параметрів є визначення кількості переданих та отриманих кадрів, кадрів із помилками, циклів перезапиту, втрачених кадрів, характеристики зміни параметрів V_{pl} і V_{eff} від довжини радіоканалу та ін.

Далі постає компромісне завдання вибору кількості параметрів оцінювання. Чим більша кількість параметрів моніторингу, тим вища достовірність оцінювання, але за меншої кількості параметрів зменшується час отримання результату. Вирішенням такого завдання, є встановлення початкових цілей: швидкий процес оцінювання з похибкою або оцінювання з високою достовірністю та значним періодом спостереження. Такі цілі формулюють вимоги, що висуваються для підвищення технічної ефективності на етапах проектування та оптимізації корпоративних телекомунікаційних мереж. Наступний етап математичного моделювання або вимірювання обраних енергетичних та інформаційних параметрів. Це передбачає задання вхідних параметрів та вибір методів математичного моделювання та експериментальних досліджень на основі програмно-апаратних засобів моніторингу. Точність вимірювання буде залежати від параметрів приймального пристрою, достовірності алгоритмів програмних засобів моніторингу та періоду спостереження [89]. У радіоканалах існують різного роду фактори впливу, які також можна віднести до вхідних параметрів при вимірюванні, але із невідомими значеннями випадкового характеру. Для інформаційних параметрів, V_{pl} визначається на основі схеми MCS тоді, як параметр V_{eff} можна оцінювати за допомогою додатків прикладного рівня створенням тестового передавання інформації з вхідним параметром V_0 .

Після отримання статистичних вимірювальних результатів основних параметрів радіоканалу, необхідно виконати оцінювання характеристик за допомогою відповідних методів, моделей та інтегральних показників ефективності, які враховують дію факторів впливу, параметри середовища передачі, умови проведення моніторингу, встановлені обмеження, статистичний зв'язок тощо. Окремо, можна оцінювати дію кожного фактору впливу на характеристики радіоканалу використовуючи інтегральні показники.

На основі запропонованих методів, моделей та інтегральних показників необхідно виконати порівняння отриманих параметрів та характеристик з технічними даними відповідного стандарту радіоканалів та отримати методологічні й практичні рекомендації для покращення технічних показників корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах початкової та неперервної оптимізації. Додатково виконати оцінювання гарантованої пропускну здатності для передачі різних типів трафіку на основі порівняння бітової швидкості із отриманими результатами оцінювання [85].

Враховуючи те, що базова побудова радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж різних стандартів є подібною, то запропонована структурно-логічна схема дослідження є справедливою для будь-яких радіоканалів стандартів Wi-Fi і 5G в межах діапазону частот 2...6 ГГц.

Тому, є доцільним постановка завдань оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi для підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж шляхом розроблення нових методів та моделей оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів із врахуванням факторів впливу та статистичних зв'язків.

Висновки до 1-го розділу

1. Проведено огляд існуючих наукових досліджень за темою дисертації для визначення сучасних тенденцій розвитку методів оцінювання і аналізу параметрів та характеристик телекомунікаційних мереж із використанням радіотехнологій. В

більшості випадків, вони направлені на мережі масового обслуговування на основі технологій 4G і 5G. У зв'язку, із значним ростом обсягів інформації, що передається, такі мережі, потребують не тільки вдосконалення технічної та інтелектуальної бази, а й створення допоміжних мереж для розвантаження головних комутаційних вузлів, роль яких, виконують приватні та корпоративні мережі, в яких найбільшого поширення отримали технології радіодоступу Wi-Fi для створення високошвидкісних радіоканалів.

2. Встановлено, що сумісне використання радіочастотного ресурсу призводить до погіршення параметрів та характеристик радіоканалів, особливо це стосується корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi, які працюють в умовах приміщень. Визначено ряд зовнішніх негативних факторів, які зменшують ефективність передавання інформації по радіоканалах, до яких можна віднести: вплив інтерференційних завад від сусідніх мереж; вплив параметрів приміщень та внутрішніх об'єктів, що приводить до багатопроменевого поширення хвиль; електромагнітної сумісності; потреба розташування додаткових комірок та низьку ефективність для використання MIMO високих порядків; існування статичних та випадкових факторів впливу та ін. Це сприяє появі затримок та помилок під час сеансів передачі трафіку, що приводить до інформаційних втрат.

3. На основі проведених досліджень, актуалізована проблематика розроблення методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi шляхом створення нових та ефективних рішень з метою підвищення технічної ефективності на етапах початкової та неперервної оптимізації.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТІ СИГНАЛУ У ДІАПАЗОНАХ 2,4 ГГЦ І 5 ГГЦ ДЛЯ МЕРЕЖ 5G/Wi-Fi

2.1 Застосування моделі вільного простору для оцінювання енергетичних параметрів радіоканалу

Модель радіоканалу. Загальну модель радіоканалу можна записати так [255]:

$$S(t) = a(t)A(t) + n(t), \quad (2.1)$$

де $S(t)$ – сигнал, який випромінюється передавачем; $A(t)$ – сигнал на вході приймача; $a(t)$ – коефіцієнт, який враховує послаблення та завмирання передавального сигналу; $n(t)$ – коефіцієнт, який враховує наявність інших джерел випромінювання в каналі.

Коефіцієнти $a(t)$ і $n(t)$ є завадами, які діють у радіоканалі, мають випадковий характер і впливають на якість передачі інформації. Завади $a(t)$ об'єднують фактори впливу середовища передачі та характеризують явища природи. До них можна віднести ефект багатопроменевого поширення хвиль, що виникає у приміщеннях із складною забудовою, інтерференція хвиль, дифракція та ін. Завади $n(t)$ є самостійними джерелами випромінювання, до яких відносять шумові завади, інтерференційні завади та ін. Під дією вказаних завад в радіоканалі виникає нерівномірність напруженості електричного поля, яку можна побачити як максимуми та мінімуми.

Корпоративні телекомунікаційні мережі, як правило використовують мережу радіодоступу, яка складається із точок доступу та абонентських пристроїв. Радіоканали являють собою пару передавач-приймач, яка виконує обмін радіосигналами через середовище. Така пара виконує роль перетворювачів інформації від мережних інтерфейсів у радіосигнали та навпаки.

Враховуючи модель (2.1), запропоновано загальну структуру радіоканалу корпоративної телекомунікаційної мережі, як показано на рис. 2.1.

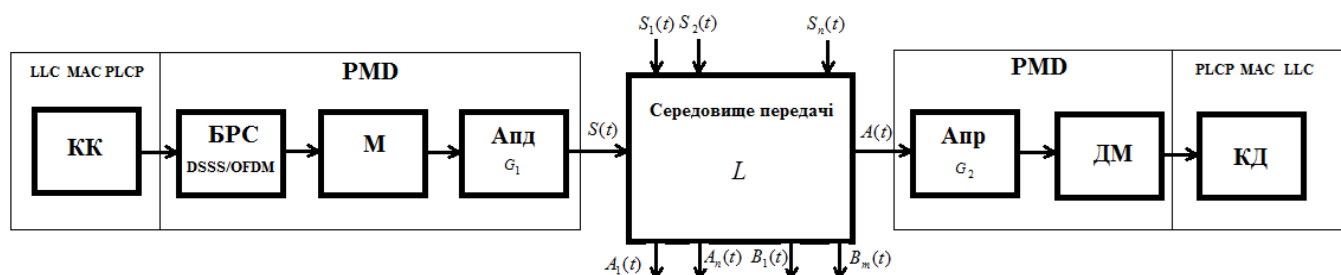


Рис. 2.1. Структура радіоканалу корпоративної телекомунікаційної мережі

Завади які мають природний характер, та завади від пристроїв інших систем передачі та побутових приладів, позначені як $B_1(t) \dots B_n(t)$, прийнято вважати шумами, $A_1(t) \dots A_n(t)$ є завадами від інших передавачів в межах одного стандарту, а $S_1(t) \dots S_n(t)$ – інтерференційні завади.

Приймальна частина виділяє корисний сигнал із середовища передачі $A(t)$, який є подібним до початкового сигналу $S(t)$. Цей сигнал надходить до приймальної антени ($A_{\text{пр}}$) де виконуються зворотні функції перетворення відносно передавальної частини блоком демодулятора (ДМ). Таким чином, на підрівні PLCP каналного декодера (КК) отримується кадр PPDU.

На каналному рівні (підрівні LLC та MAC) та підрівні PLCP виконується завадостійке кодування, так званим каналним кодером (КК). Тут виконується формування кадру PPDU, який вміщує в собі службову та корисну інформацію для передачі. Підрівень PMD каналного рівня, перетворює двійкову послідовність у модульоване ВЧ коливання за допомогою квадратурного модулятора (М) та блока розширення спектру (БРС). Для стандартів 802.11n та вище використовується технологія мультиплексування OFDM, для 802.11ax – COFDM, а для нижчих – DSSS. Аналогічна технологія використовується у стандарті 5G. На виході передавальної антени ($A_{\text{пд}}$) формується сигнал $S(t)$ та надходить у середовище передачі. Потужність сигналу передавача є наперед визначеною величиною (100 мВт (20 дБм) для Wi-Fi) в умовах обмеженості порогових значень випромінювання у приміщеннях. Поряд із цим значенням

внутрішні шуми електричних кіл передавача є незначними і ними можна нехтувати. Основні завади, що приводять до зміни та затухання сигналу діють у середовищі передачі.

Модель радіоканалу можна розглядати як найменшу структурну одиницю корпоративної телекомунікаційної мережі. Якщо, потужність сигналу передавачів є наперед визначеною величиною, тоді вираз (2.1), можна записати наступним чином:

$$P_{Rx} = L \cdot P_{Tx} + P_i + P_{ш}, \quad (2.2)$$

де P_{Tx} – потужність сигналу на виході передавача, вираз (1.2); P_{Rx} – рівень потужності сигналу на вході приймача, вираз (1.3); L – характеристика затухання сигналу у середовищі передачі; P_i – рівень інтерференційних завад; $P_{ш}$ – рівень шумових завад.

Коефіцієнти підсилення антен передавача та приймача розраховуються за наступними виразами [256]:

$$G_1 = \left(\frac{D_0}{D} \right)^2, \quad G_2 = S_a \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2, \quad (2.3)$$

де S_a – ефективна площа приймальної антени.

Втрати потужності сигналу в середовищі передачі визначається за наступною формулою [255]:

$$L = \frac{(4\pi D)^2}{\lambda^2 G_1 G_2 \eta_1 \eta_2}, \quad (2.4)$$

де η_1, η_2 – коефіцієнти корисної дії фідерів передавача та приймача.

Затухання характеризується зміною параметрів середовища під час передачі та залежить від явищ природи. Основний фактор, що визначає затухання у приміщенні – багатопроменеве поширення хвиль. Таке явище виникає із-за неоднорідності середовища передачі, які створюються природними або штучними перешкодами. Якщо припустити, що корпоративні телекомунікаційні мережі 5G/Wi-Fi використовуються переважно у приміщеннях і територіях із складною забудовою, то найбільш поширеною архітектурною одиницею можна вважати приміщення, яке має підлогу, стелю, стіни, а також наявність певної кількості внутрішніх об'єктів. Таким чином, при існуванні активного випромінюючого пристрою, в такому приміщенні буде існувати складна багатопроменева інтерференційна картина на основі законів відбиття від поверхонь різного типу та положення у просторі. Загальне результуюче поле можна визначити на основі амплітуди й фази відбитих хвиль від відповідних поверхонь. Враховуючи це, коригуючий коефіцієнт втрат можна записати так [258]:

$$F = \left| F_0 + F_n \rho_n e^{-j\alpha_n} + F_c \rho_c e^{-j\alpha_c} + n F_{cm} \rho_{cm} e^{-j\alpha_{cm}} + \sum_{i=1}^k F_{o,i} \rho_{o,i} e^{-j\alpha_{o,i}} \right|^2, \quad (2.5)$$

де F_x – інтерференційні коефіцієнти, що враховують направлені властивості випромінювання до приймача через відповідну поверхню (де x : n – підлога, c – стеля, st – стіни, o – об'єкти у приміщенні); ρ – комплексні коефіцієнти відбиття хвиль від поверхні; α – фазові коефіцієнти відбиття, які враховують довжину прямої та непрямої хвилі; k – кількість поверхонь відбиття від об'єктів у приміщенні.

Багатопроменеве поширення хвиль створює швидкі затухання потужності у просторі, які базуються на отриманні хвиль із однаковими або різними за знаками фазами. Тому, в певних точках простору можуть виникати максимуми та мінімуми рівня сигналу у просторовому розподілі. В такому випадку, коефіцієнт затухання, який буде враховувати висоту розташування передавальної та приймальної антен, можна записати так [256]:

$$L = \frac{4\pi^2 D^4}{\lambda^2 G_1 G_2 \eta_1 \eta_2 h_1^2 h_2^2}, \quad (2.6)$$

де h_1 і h_2 – висота знаходження приймальної та передавальної антен на рівнем підлоги.

Завади можна вважати самостійними джерелами випромінювання, до яких можна використовувати правило суперпозиції. Як зазначалось вище, такі джерела можна розділити на дві групи: інтерференційні завади та шуми. Інтерференція у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж – це сигнали від інших передавачів цього ж стандарту, які використовують однаковий частотний канал або частково перекривають його. При цьому можуть створюватись так звані суміщенні та сусідні канали [112]. При наявності великої кількості безпроводних мереж основним джерелом завад є інтерференція. На практиці вплив інтерференції виникає при збільшенні навантаження на мережі при передачі великих об'ємів інформації, які використовують один той самий частотний канал.

Враховуючи те, що інтерференційних джерел може бути значна кількість, то загальну потужність таких завад можна визначити на основі виразу (1.3). Враховуючи закон суперпозиції, отримаємо:

$$P_{in} = \frac{G_2}{L_{RX}} \sum_{i=1}^N \frac{P_{c.c.i} G_{c.c.i}}{G_{\varphi,i} L_{i,i} L_3}, \quad (2.7)$$

де L_i – послаблення в інтерференційному радіоканалі; L_3 – затухання в антенно-фідерному пристрої інтерференційного передавача; G_{φ} – послаблення при мінімальній кутовій відстані між антенами; $G_{c.c.}$ – коефіцієнт підсилення антени суміжної інтерференційної станції; $P_{c.c.}$ – потужність сигналу суміжної станції; L_{RX} – затухання в антенно-фідерному пристрої приймача; N – кількість інтерференційних станцій у межах зони покриття базової станції.

Шумові джерела можна оцінити параметром $P_{ш}$, що містить в собі як внутрішні шуми приймального тракту, так і зовнішні шуми, які надходять із

радіоканалу на приймальну антену. До шумів у радіоканалі можна віднести джерела випромінювання пристроїв інших стандартів та випромінювання у навколишньому середовищі.

Враховуючи [257], рівень шумів можна визначити за наступним виразом:

$$P_u = kT \left[\left(\frac{k_u}{k_\phi} - 1 \right) + \left(\frac{1}{P_0} \sum_{i=1}^m P_i - 1 \right) \right], \quad (2.8)$$

де k_u – коефіцієнт шуму приймального тракту; k_ϕ – коефіцієнт передачі фідера; P_i – потужність шумів середовища передачі; m – кількість шумових завад у середовищі передачі; P_0 – рівень теплового шуму Землі.

Підставляючи (1.2), (2.3), (2.4), (2.5), (2.6), (2.7) і (2.8) у (2.2), отримаємо:

$$P_{Rx} = \frac{4kTD^{\mu-4} \xi \gamma \eta_1 \eta_2 h_1^2 h_2^2}{D_0^{\mu-2}} F_i - \frac{G_2}{L_{RX}} \left(\sum_{i=1}^N \frac{P_{c.c.i} G_{c.c.i}}{G_{\phi.i} L_{i.i} L_3} \right) - kT \left[\left(\frac{k_u}{k_\phi} - 1 \right) + \left(\frac{1}{P_0} \sum_{i=1}^m P_i - 1 \right) \right]. \quad (2.9)$$

Модель (2.9) є узагальненим описом радіоканалів стандартів 5G/Wi-Fi і дозволяє оцінювати потужність сигналу на вході приймача на основі класичних математичних описів параметрів. Такі параметри можуть бути досить складними в обчисленні і можуть містити багато складових, які досить складно отримати. Для прикладу, це коефіцієнт результуючого поля та інтерференційні завади. Точність визначення таких коефіцієнтів буде мати досить суттєвий вплив на кінцевий результат.

Модель радіоканалу із застосуванням технології MIMO. Технологія MIMO являє собою систему з n передавальними і m приймальними антенами, яка здатна забезпечити теоретичну пікову пропускну здатність у n раз більшу (при умові

$n=m$), ніж системи з однією парою антен та отримали широкого поширення у стандартах 5G/Wi-Fi. Це досягається за рахунок того, що передавач розбиває потік даних на незалежні послідовності бітів і пересилає їх одночасно, використовуючи масив антен. По суті, це можна представити як радіоканал в якому існує множина підканалів, які займають однаковий частотний ресурс, що приводить до виникнення додаткових вимог для передачі інформації. Наприклад, підвищення максимального значення коефіцієнта сигнал/шум досягається за рахунок збільшення конфігурації антен $n \times m$ [116].

Для такого радіоканалу, основним енергетичним параметром буде сумарна потужність сигналів на вході приймача [210]. Використовуючи рис. 2.1, структуру радіоканалу 5G/Wi-Fi із технологією MIMO можна представити, як показано на рис. 2.2.

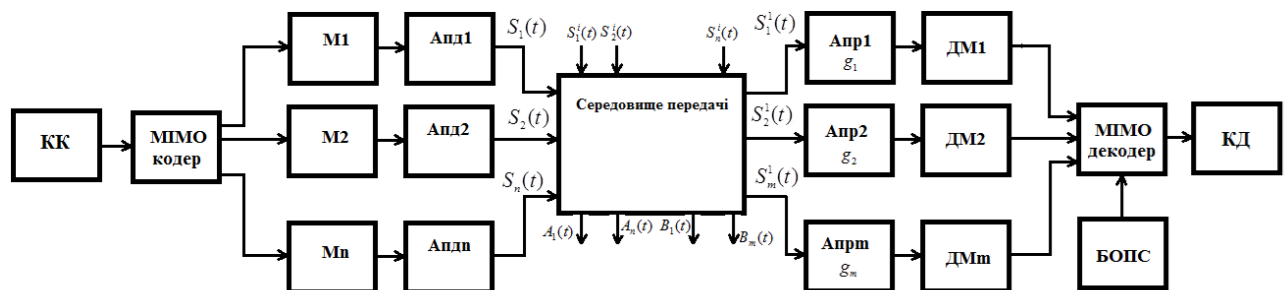


Рис. 2.2. Схема радіоканалу з використанням технології MIMO

Технологія MIMO являє собою набір розширень каналного та фізичного рівнів для базової специфікації побудови радіоканалу. Перша група розширень включає в себе блок кодера MIMO, який реалізується із використанням зворотного швидкого перетворення Фур'є в якості модулятора. Тут інформація перетворюється на частотні коефіцієнти, які після перетворення стають часовими інтервалами, кожен з яких відповідає одному із n передавачів. Для запобігання колізій додатково додаються захисні інтервали, які мають назву циклових префіксів (CP – cyclic prefix). Відповідний інформаційний потік надходить у модулятор де за рахунок пари аналого-цифрових перетворювачів створюється реальна і уявна компоненти сигналу OFDM та перетворюється у модульований

ВЧ сигнал. На виході передавальної антени ($A_{\text{пд.н}}$) n -го передавача формується сигнал $S_n(t)$ та надходить у середовище передачі. На приймальній стороні всі операції виконуються в зворотному напрямку. При надходженні сигналу $S^i_m(t)$ із середовища передачі отримуються блоки інформації від кожного приймального пристрою m ($A_{\text{пд.м}}, D_{\text{м.м}}$), а в декодері МІМО виконується швидке перетворення Фур'є на основі даних із блока оцінки параметрів сигналу (БОПС), створюючи результуючу послідовність. Як правило, у середовищі передачі існують завади природного характеру, від пристроїв систем передачі та побутових приладів – $B_1(t) \dots B_n(t)$ та інтерференційні завади – $A_1(t) \dots A_n(t)$, які вносять інші передавачі того ж самого стандарту $S^i_1(t) \dots S^i_l(t)$ [88]. До завад можна віднести завади які створюються множиною пар приймач-передавач системи МІМО, оскільки вони працюють на одному частотному каналі і в кожній приймальній антені $A_{\text{пд.м}}$ буде наводитись сигнал від кожної передавальної антени $A_{\text{пд.н}}$. Як показують дослідження [112, 252] рівень випромінювання для кожної антени є однаковим.

Друга група розширень – технологія об'єднання сигналів із забезпеченням максимального відношення сигнал/шум (MRC – Maximal Ratio Combining), яка реалізується при існуванні у мережі точок доступу, які підтримують технологію МІМО, і призначена для підвищення ефективності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. В загальному випадку такий процес можна записати як функцію розподілу випадкової величини коефіцієнта сигнал/шум [220]:

$$p(S / N) = \frac{S / N^{N-1} e^{\frac{-S/N}{E_b/N_0}}}{(N-1)!(E_b / N_0)^N}, \quad (2.10)$$

де N – кількість випромінюючих пристроїв у мережі; S/N – максимальне значення комбінованого коефіцієнту сигнал/шум після створення комбінованого сигналу, яке можна визначити так:

$$S / N = \frac{(E_b / N_0)(\sum g_m a_m)^2}{(\sum g_m^2)^2}, \quad (2.11)$$

де g_m – відношення сигнал/шум, яке пов'язане із додаванням однакових по фазі сигналів для кожного окремого просторового каналу, a_m – рівень обвідної сигналу при додаванні однакових по фазі сигналів.

Як видно із виразів (2.10) і (2.11), розширення другої групи дозволяє підвищити відношення сигнал/шум збільшуючи кількість одночасно працюючих радіоканалів, що дає можливість збільшити зону покриття.

З точки зору оцінювання основного енергетичного параметра, використаємо вираз (2.1). Тоді, модель радіоканалу із застосуванням технології MIMO виразимо як сумарний рівень сигналу на вході приймача:

$$S_m(t) = \sqrt{S / N} \cdot a(t) \cdot S_n(t) + A_n(t) + B_m(t). \quad (2.12)$$

Оскільки, технологія MIMO передбачає існування множини приймальних антен та множини передавальних антен, і відповідних їм пар приймач-передавач, то в такому випадку, кожна приймальна антена буде отримувати сигнал від кожної передавальної антени, створюючи при цьому комплексний сигнал на вході приймача. Найпростіший варіант передбачає вибір приймачем найкращого сигналу із множини сигналів на приймальних антенах. Тоді, для кожного радіоканалу існує дія інтерференційних та шумових завад та існує свій коефіцієнт згасання $a_i(t)$ [259]. Таким чином, для масиву приймально-передавальних антен можна записати так:

$$\begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_m(t) \end{bmatrix} = \sqrt{S / N} \cdot \begin{bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ a_i(t) \end{bmatrix} \cdot S_n(t) + \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Така система дає змогу покращувати ефективність радіоканалу та отримала назву технології об'єднання сигналів із забезпеченням максимального MRC. При цьому всі прийняті сигнали на всі доступні антени, якщо вони прийняті один до одного у фазі, об'єднуються в один комбінований, який має вищий рівень ніж при наявності одного передавача [260]. Тоді, буде виконуватись нерівність:

$$S_{MRC}(t) = \sqrt{\frac{S}{N}} \cdot (|a_1(t)|^2 + \dots + |a_i(t)|^2) \cdot S_n(t) + \begin{bmatrix} a_1^i(t) \\ a_2^i(t) \\ a_i^i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

де $a_i^i(t)$ – коефіцієнт, який враховує послаблення та завмирання передавального сигналу для інтерференційного кола матриці MIMO.

При створенні незалежних радіоканалів, наприклад від точки доступу до різних абонентів із індивідуальними радіоканалами, використовується просторове мультиплексування (SM – spatial multiplexing) [219]. Результуючий потік інформації збільшується за рахунок кількості незалежних радіоканалів та обмежується максимально можливим числом пар приймач-передавач і вся система описується як $n \times m$. Враховуючи максимально можливий рівень випромінювання сигналу передавача, потужність для кожної передавальної антени буде поділятися на кількість передавачів, щоб сумарне значення не перевищувало граничні норми. Тоді, вираз (2.13) можна записати так:

$$\begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_n(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{S}{Nm}} \cdot \begin{bmatrix} a_{11}(t) \dots a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) \dots a_{2n}(t) \\ a_{m1}(t) \dots a_{mn}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Враховуючи OFDM, для отримання інформації із підносійних у частотному каналі, виконується операція порівняння переданого сигналу із шумоподібним сигналом. Такий процес можна записати так:

$$S_{uu}(t) = S_n(t) + \left(\sqrt{S/N} \cdot a(t) \right)^{-1} \cdot (A_n(t) + B_m(t)), \quad (2.16)$$

$$S_{uu}^{MRC}(t) = S_n(t) + \frac{1}{\sqrt{S/N} (|a_1(t)|^2 + |a_i(t)|^2)} \begin{bmatrix} a_1^i(t) \\ a_2^i(t) \\ a_i^i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$S_{uu}^{m \times n}(t) = S_n + \frac{A_{m \times n}}{\sqrt{S/Nm} (A_{m \times n} A'_{m \times n})} \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

де $S_{uu}(t)$ – шумоподібний сигнал для одного радіоканалу; $S_{uu}^{MRC}(t)$ – шумоподібний сигнал для технології MRC; $S_{uu}^{m \times n}(t)$ – шумоподібний сигнал просторового мультиплексування для будь-якої кількості приймальних та передавальних антен; $A_{m \times n}$ – матриця характеристик затухання $a_{mn}(t)$; $A'_{m \times n}$ – зворотна матриця характеристик затухання $a_{mn}(t)$; S_n – матриця сигналів від передавальних антен.

Вираз (2.20) є моделлю радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж із використанням технології MIMO. Враховуючи вираз (2.9), модель (2.18) можна записати так:

$$P_{Rx}^{n \times m} = \begin{bmatrix} P_{Tx.1} \\ P_{Tx.2} \\ P_{Tx.n} \end{bmatrix} - \frac{L_{m \times n} \sum g_m^2}{\sqrt{E_b / N_0} \sum (g_m a_m) (L_{m \times n} L'_{m \times n})} \begin{bmatrix} P_{i.1} + P_{u.1} \\ P_{i.2} + P_{u.2} \\ P_{i.n} + P_{u.m} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Перевагою запропонованої моделі є врахування великої кількості параметрів та взаємозв'язків між ними, які характеризують всю апаратну частину фізичного рівня та середовище поширення хвиль для радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. В свою чергу, врахування таких параметрів є досить

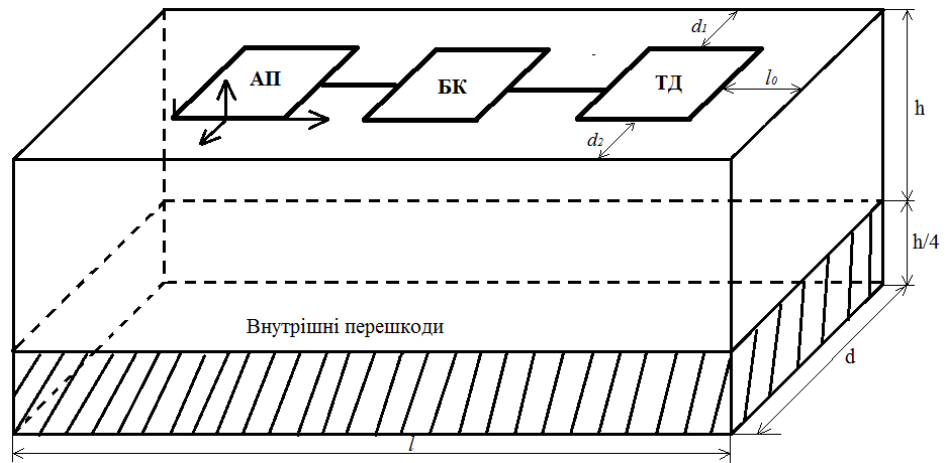
значним недоліком, оскільки знайти їх значення та характеристики з практичної точки зору є досить складним процесом.

2.2 Оцінювання потужності сигналу на вході приймача для діапазону 2,4 ГГц

Для розроблення моделей оцінювання потужності сигналу на вході приймача необхідно отримати та дослідити експериментальні характеристики затухання сигналу у просторі приміщення. Враховуючи подібність стандартів 5G і Wi-Fi, дослідження виконано для стандарту Wi-Fi із-за більшого поширення та доступності обладнання, та врахування близько 70% споживання трафіку користувачами у приміщеннях. Для цього, запропоновано структуру мережі на основі точки доступу (ТД) та абонентського пристрою (АП). В даному випадку, використовувалась ТД із однією випромінюючою антеною та режим роботи у стандарті 802.11n, а для діапазону 5 ГГц ТД із технологію MIMO 3×3 та стандарт 802.11ac. Дослідження виконано в різних приміщеннях, в різні періоди часу та відмінною кількістю зовнішніх завад. Методика досліджень є однаковою для частотних діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц.

Для досліджень запропоновано використовувати два найбільш поширених положення ТД у просторі приміщення: кутове та центральне. Структура мережі наведено на рис. 2.3.

Приміщення має стандартну прямокутну форму із розмірами $h=3\text{м}$, $l=14\text{м}$ та $d=6\text{м}$. Кутове положення ТД задається координатами $d_1=d_2=3\text{м}$ і $l_0=1\text{м}$. Центральне положення задається наступними координатами: $d_0=d/2$ і $l_0=l/2$. Основним критерієм для оцінювання є потужність сигналу на вході приймача P_m (RSSI). Крім того, в приміщенні до висоти $h/4$ знаходились різноманітні об'єкти з різнорідними поверхнями відбиття.



а)



б)

Рис. 2.3. Структура мережі для експериментальних досліджень: а – для кутового положення ТД; б – центрального положення ТД

Як видно із фрагментів моніторингу, які наведено у розділі 1, можна припустити, що найбільш оптимальним часовим проміжком для вимірювання усередненого значення потужності сигналу є період спостереження 360 с, для дискретного часу отримання результату моніторингу 1 с.

Вимірювальне значення отримується за допомогою програмно-апаратних засобів моніторингу приймального пристрою [260, 261]. Процес вимірювання такого параметра можна записати так:

$$P_m \approx \frac{1}{T} \int_0^T P_m(t) dt \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i}, \quad (2.20)$$

де $P_{m.i}$ – вимірювання потужності сигналу за час одного циклу моніторингу; n – кількість циклів вимірювання протягом періоду спостереження T , для отримання необхідної достовірності.

Часова характеристика параметра P_m може мати досить значну нерівномірність та містити промахи вимірювань, які допускаються апаратними та програмними засобами [140], тому, доцільно використовувати операцію усереднення.

Для оцінювання розподілу рівня потужності сигналу у просторі приміщенні, обрано три значення параметра висоти h . Перший $h=0$ м – де існує досить значна кількість перешкод і найбільш імовірна зона можливого знаходження пристроїв із концепції інтернету речей [3]. Другий параметр $h=1,5$ м показує одну із найбільш поширених зон розташувань ТД та рівень знаходження абонентських пристроїв. Третій параметр $h=3$ м, що показує стандартну висоту приміщення і другу імовірну зону, де можуть знаходитись як пристрої із концепції інтернету речей, так і точки доступу або ретранслятори.

На основі запропонованої методики проведено ряд експериментальних досліджень потужності сигналу на вході приймача для радіоканалу стандарту 802.11 у діапазоні 2,4 ГГц. Результати просторових розподілів наведено на рис. 2.4.

Спершу розглянемо розподіл сигналу для умови $h=1,5$ м. Як видно із рис. 2.4, а, тут спостерігається досить нерівномірна поверхня із значно вираженими максимумами та мінімумами, рівень яких збільшується при наближенні до стін.

Обладнання сімейства стандартів 802.11 використовує антену, яка є чверть хвилевим вібратором [262]. Якщо розглядати неліцензований частотний діапазон

2,4 ГГц, то тут довжина хвилі становить $12,12\dots 12,49$ см і, в загальному випадку, розмір такої антени становить в середньому 31 мм. В більшості випадків антена розташовується вертикально та є всенаправленою.

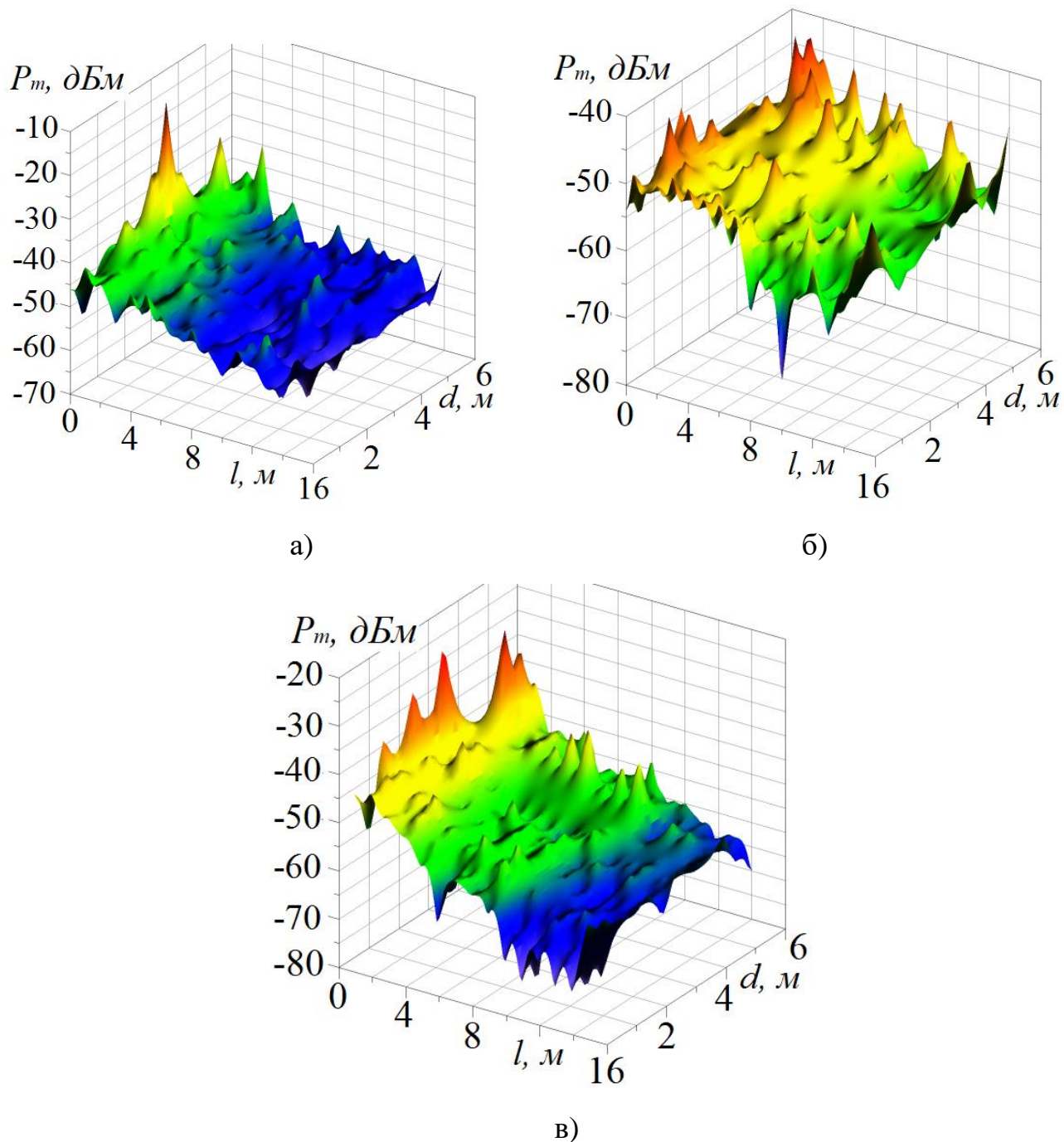


Рис. 2.4. Розподіл потужності сигналу у приміщенні для умови: а – $h=1,5$ м;
 б – $h=0$ м; в – $h=3$ м

Тоді максимальна енергія випромінювання концентрується по центру такої антени паралельно до підлоги приміщення, а випромінювання вздовж осі буде відсутнім. Але результати експериментальних досліджень показують, що максимальне підсилення існує біля ТД і розподіл має виражені максимуми та мінімуми (флуктуації), які виникають за рахунок багатопроменевого поширення хвиль у приміщенні.

Відносно розподілу для умов $h=0$ м і $h=3$ м спостерігається досить складна картина із досить значними флуктуаціями сигналу. Найбільший рівень таких флуктуацій існує на границі стелі і підлоги зі стінами. Це приводить до значного затухання сигналу на відстанях більше 10 м від ТД, а в результаті – до зменшення ефективності передавання інформації у радіоканалі.

Для побудови моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача розкладемо отриманий просторовий розподіл за двома координатами l і d . Тоді, для умови $h=1,5$ м результати досліджень отримають вигляд, як на рис. 2.5.

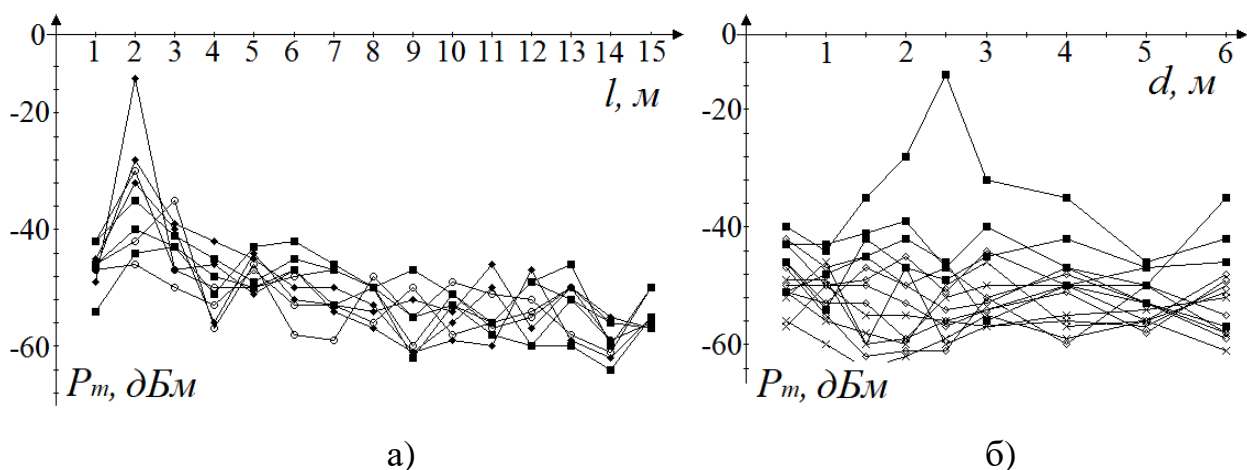


Рис. 2.5. Розподіл потужності сигналу за координатою: а – l ; б – d

Якщо, не враховувати пік випромінювання біля ТД, то для координат l і d затухання має квадратичний характер. Тоді, на основі регресійного аналізу, просторовий розподіл потужності сигналу на вході приймача для абонентського пристрою, можна записати так:

$$\begin{cases} P_l = cl^2 + gl + k, \\ P_d = ad^2 + bd + z, \end{cases} \quad (2.21)$$

де c, g, a, b – коефіцієнти затухання сигналу по відповідній координаті; k, z – початкові рівні.

Коефіцієнти c, g, a і b можна визначити експериментально, виходячи із отриманих характеристик розподілу.

$$c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_i \pm \Delta c, \quad g = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_i \pm \Delta g,$$

$$a = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q a_i \pm \Delta a, \quad b = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q b_i \pm \Delta b, \quad (2.22)$$

де m і q – кількість отриманих характеристик по координаті l і d відповідно; $\Delta c, \Delta g, \Delta a, \Delta b$ – інтервали, які визначають межі зміни коефіцієнтів затухання, та оцінюють наявність максимумів і мінімумів просторового розподілу потужності сигналу, що виникає внаслідок відбиття від поверхонь у приміщенні.

Припустимо, що на відстані 1 м від ТД за координатою l , потужність сигналу на вході приймача має максимальне значення. Для задання положення ТД, застосуємо параметр d_0 від центра по координаті d . Тоді коефіцієнти початкових рівнів можна виразити через вимірювальний параметр P_m (вираз 2.20):

$$k = P_m - c - g,$$

$$z = P_m - a \left(\frac{d}{2} + d_0 \right)^2 - b \left(\frac{d}{2} + d_0 \right), \quad (2.23)$$

$$d_0 \in (-d/2; d/2).$$

Вирази (2.23) дають можливість враховувати параметри будь-якого обладнання та приміщення, а також всі зміни у радіоканалі в реальному часі. Таким чином, зміна параметра P_m враховує вплив всіх статичних та випадкових факторів під час існування радіоканалу при оцінюванні просторового розподілу.

Як видно із рис. 2.5, на графіках присутні максимуми та мінімуми, що пов'язані із процесами відбиття та багатопроменевим поширенням хвиль. Це створює досить неоднорідний розподіл сигналу у приміщенні. Виходячи із великої кількості результатів експериментальних досліджень та роботи [110], можна зробити узагальнення, що в розподілі сигналу для будь-якого приміщення, виникають ділянки підсилення та послаблення із флуктуаціями до $\pm 2,5$ дБм, а на відстанях до чотирьох метрів від відбиваючої поверхні – ± 5 дБм. Рівень таких флуктуацій задамо як флуктуації параметра P_m та позначимо як ΔP .

Враховуючи інтервал флуктуацій та підставляючи (2.23) у (2.21), модель розподілу потужності сигналу на вході приймача для кутового положення ТД у приміщенні, отримає наступний вигляд:

$$\begin{cases} P_l = cl^2 + gl + (P_m - c - g) \pm \Delta P, \\ P_d = ad^2 + bd + \left(P_m - a \left(\frac{d}{2} + d_0 \right)^2 - b \left(\frac{d}{2} + d_0 \right) \right) \pm \Delta P. \end{cases} \quad (2.24)$$

Для будь-якої точки приміщення із координатами (l, d) повинна виконуватись умова $P_l = P_d$, тоді систему рівнянь (2.24) можна переписати як загальну потужність сигналу на вході приймача, що залежить від двох координат:

$$P_{Rx} \approx \frac{P_l + P_d}{2} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} + \frac{1}{2} c (l^2 - 1) + \frac{1}{2} g (l - 1) + \frac{1}{2} a (3d^2 / 4 - dd_0 / 2 - d_0^2) + \frac{1}{2} b (d / 2 - d_0) \pm \Delta P. \quad (2.25)$$

Вираз (2.25) є моделлю, яка дозволяє оцінювати просторовий розподіл потужності сигналу на вході приймача при кутовому положенні ТД у приміщенні використовуючи будь-яке абонентське обладнання та вбудовані програмно-апаратні засоби моніторингу. Запропонована модель враховує максимально можливу кількість факторів впливу для будь-якого радіоканалу корпоративних телекомунікаційних мереж і має просту і доступну реалізацію на практиці.

Результати експериментальних досліджень просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача для центрального положення ТД, наведено на рис. 2.6.

Просторовий розподіл сигналу для умови $h=1,5$ м показує, що на відстані до двох метрів від ТД, спостерігаються досить значні флуктуації із значно вираженими максимумами біля ТД. Так як передавач знаходиться по центру, то флуктуації біля стін є менш вираженими навіть при існуванні великої кількості відбиваючих поверхонь. Для параметрів $h=0$ м і $h=3$ м спостерігається більш рівномірна характеристика з менш вираженими максимумами, оскільки відбиваючі поверхні знаходяться безпосередньо біля випромінюючої антени. Аналогічно до кутового положення, розподіл сигналу має форму близьку до квадратичної.

При центральному положенні ТД добре видно концентрацію енергії випромінювання безпосередньо біля передавальної антени на відстані до двох метрів. Після двох метрів від антени, спостерігається значне згасання сигналу, в середньому біля 20 дБм. Крім того, за координатою d біля стелі ($h=3$ м), флуктуації мають більший інтервал, ніж відхилення від середньостатистичного рівня при кутовому положенні.

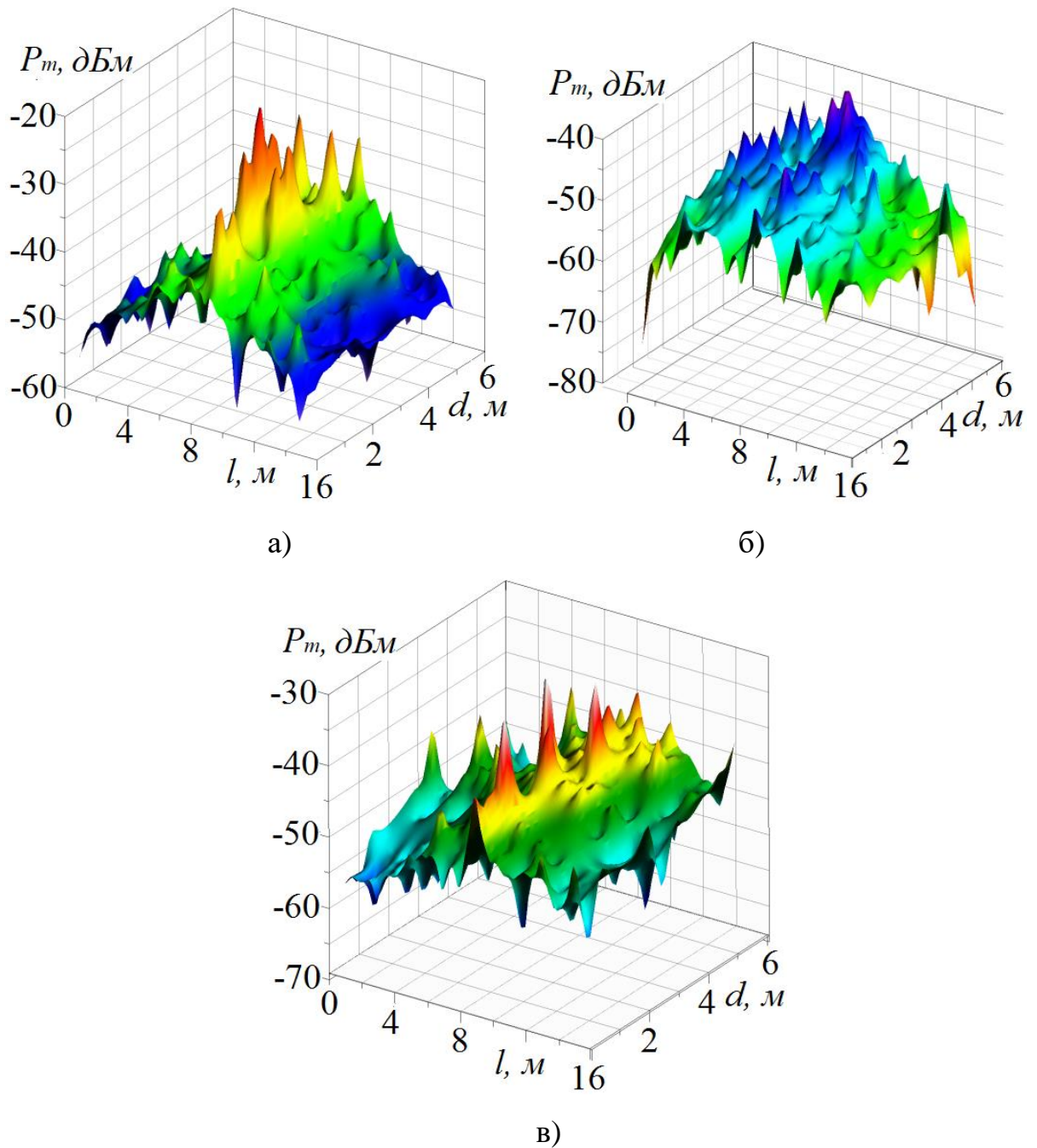


Рис. 2.6. Розподіл потужності сигналу для центрального положення точки доступу у приміщенні при умові: а – $h=1,5$ м; б – $h=0$ м; в – $h=3$ м

Як і при кутовому положенні ТД, для отримання моделі оцінювання, розкладемо просторовий розподіл потужності за двома координатами l і d . Тоді для умови $h=1,5$ м просторовий розподіл прийме вигляд, як показано на рис. 2.7.

Розподіл потужності сигналу має квадратичну форму, тому модель регресії, для такого випадку, буде описуватись виразом (2.21).

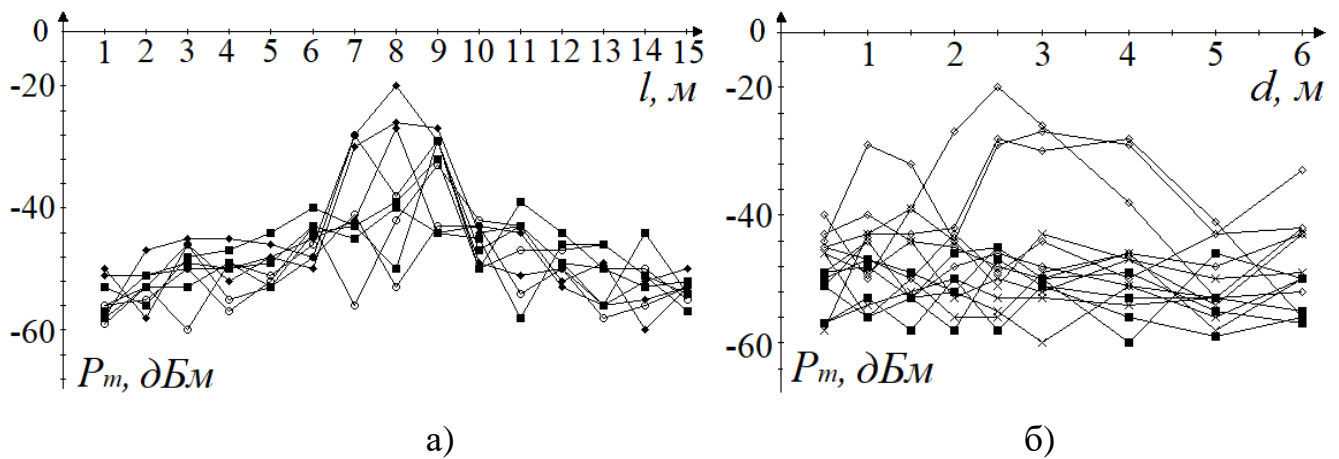


Рис. 2.7. Розподіл потужності сигналу для центрального розташування ТД за координатою: $a - l$; $b - d$

Як видно із результатів досліджень на рис. 2.7, у центрі приміщення сконцентрована максимальна енергія випромінювання. Тоді, положення точки доступу можна задати координатами ($d_0=d/2$; $l_0=l/2$). Із врахуванням цього, рівняння (2.21) отримає наступний вигляд:

$$\begin{cases} P_l = \frac{3}{4}cl^2 + \frac{1}{2}gl + P_m, \\ P_d = \frac{3}{4}ad^2 + \frac{1}{2}bd + P_m. \end{cases} \quad (2.26)$$

Під час досліджень центрального положення ТД, було виявлено, що, максимальна енергія сигналу концентрується на відстані до двох метрів від випромінюючої антени. Розрахунок початкових рівнів враховуючи відстань два метри від ТД, може створювати похибку оцінювання до 20 дБм. Так як, в даному випадку, оцінювання виконується для приміщення, що значно більше двох метрів, то максимальною концентрацією енергії можна знехтувати. Тому, є доцільним використовувати контрольне вимірювання параметра P_m , на відстані 2 м від ТД. В такому випадку положення ТД визначається на основі координати $(2+l/2; d/2)$ і вирази (2.23) можна записати так:

$$k = P_m - c \left(2 + \frac{l}{2} \right)^2 - g \left(2 + \frac{l}{2} \right), \quad (2.27)$$

$$z = P_m - a \left(\frac{d}{2} \right)^2 - b \left(\frac{d}{2} \right).$$

Підставляючи вирази (2.27) у (2.26), отримаємо:

$$\begin{cases} P_l = cl^2 + gl - c \left(2 + \frac{l}{2} \right)^2 - g \left(2 + \frac{l}{2} \right) + P_m \pm \Delta P, \\ P_d = ad^2 + bd - a \left(\frac{d}{2} \right)^2 - b \left(\frac{d}{2} \right) + P_m \pm \Delta P. \end{cases} \quad (2.28)$$

При умові $P_l = P_d$ у будь-якій точці приміщення (l, d) , систему рівнянь (2.28) можна записати так:

$$\begin{aligned} P_{Rx} &= \frac{P_l + P_d}{2} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} + \frac{3}{8} (cl^2 + ad^2) - \\ &- c(l-2) + g \left(\frac{1}{4}l - 1 \right) + \frac{1}{4}bd \pm \Delta P. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Модель (2.29), дає можливість оцінювати просторовий розподіл потужності сигналу на вході приймача для умови центрального положення ТД у приміщенні для частотного діапазону 2,4 ГГц. При цьому, враховуються всі фактори впливу що існують у зоні покриття точки доступу.

Для перевірки правильності отриманих моделей виконаємо математичне дослідження для виразів (2.25) та (2.29). Для цього, використаємо середньостатистичні значення коефіцієнтів згасання розрахованих на основі виразів (2.22), що отримані на основі результатів експериментальних досліджень. Припустимо, що ТД знаходиться на початку координатної сітки, тоді, в

приміщенні із розмірами (l, d) початок координат ТД знаходиться в точці $(0, d/2)$. Графічне представлення моделі (2.25) наведено на рис. 2.8.

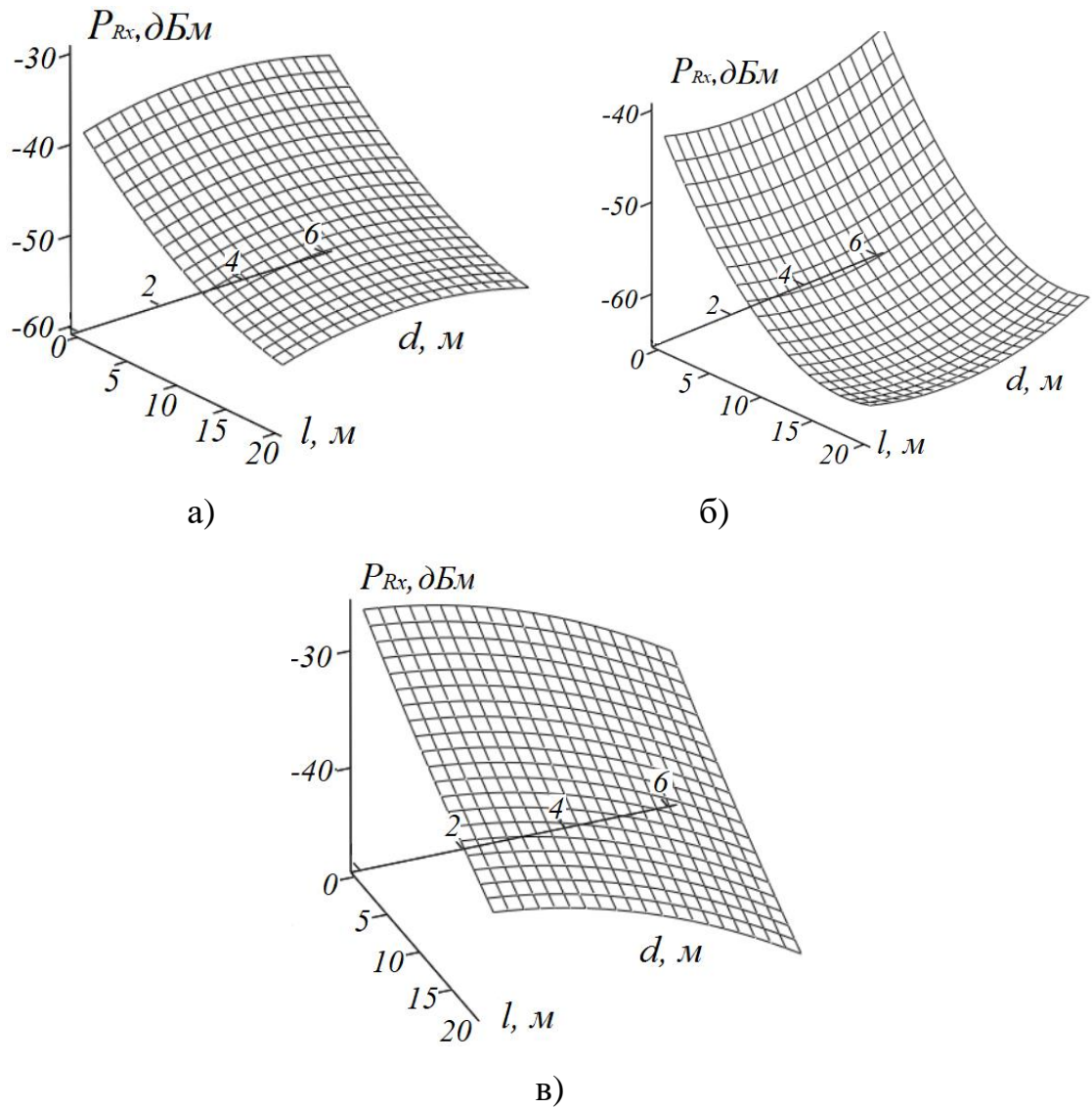


Рис. 2.8. Графічне представлення моделі (2.25) для умови: а – $h=1,5$ м; б – $h=0$ м; в – $h=3$ м

Для центрального положення ТД, початкова точка знаходиться за координатами $(l/2, d/2)$, тоді графічне представлення моделі (2.29), можна представити як на рис. 2.9.

Аналіз результатів на рис. 2.8 та рис. 2.9 показує, що отримані просторові розподіли мають несиметричність, яка показує нерівномірність випромінювання сигналу для всенаправлених антен.

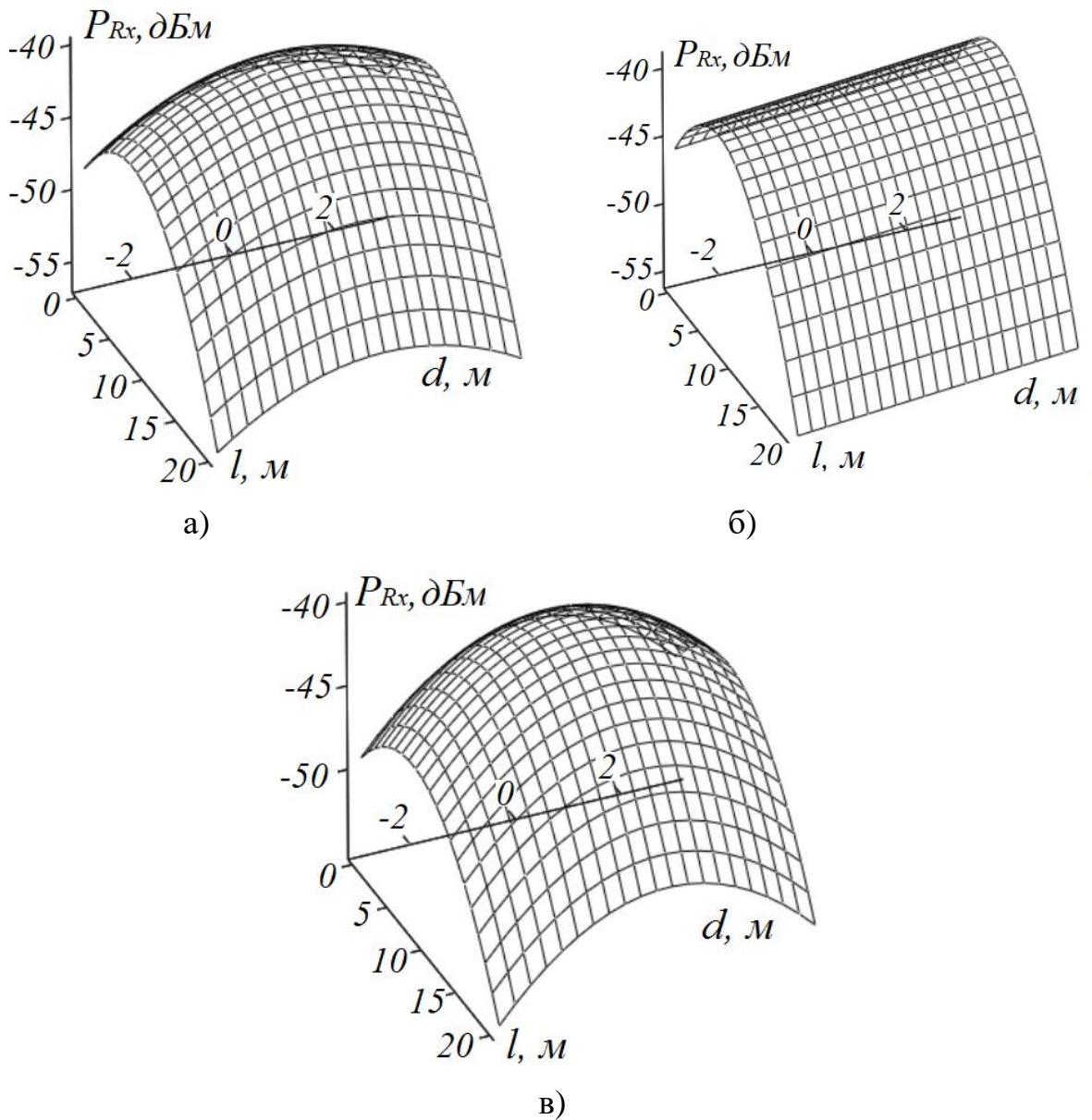


Рис. 2.9. Графічне представлення моделі (2.29) для умови: а – $h=1,5$ м;
 б – $h=0$ м; в – $h=3$ м

З іншого боку додаткова несиметричність забезпечується багатопроменевим поширенням хвиль у приміщенні де є менший вплив зі сторони вікон (менша величина відбиваючих поверхонь). Запропоновані моделі є справедливими для оцінювання просторового розподілу сигналу у приміщенні, з точки зору абонентського пристрою, із розмірами до 20×20 м.

2.3 Оцінювання потужності сигналу на вході приймача для діапазону 5 ГГц

Оцінювання потужності сигналу на вході приймача для діапазону 5 ГГц проведено на основі методики експериментальних досліджень у пп. 2.1, але для стандарту 802.11ac із технологією МІМО 3x1. Дослідження просторового розподілу параметра P_m у приміщенні для частотного діапазону 5 ГГц, показали наявність схожих флуктуацій, як і у діапазоні 2.4 ГГц, для різних значень висоти розташування випромінюючих антен ТД. Тому, обмежимося одним випадком $h=1,5\text{м}$, але для різної кількості відбиваючих поверхонь у приміщенні.

Розглянемо випадок, коли у приміщенні знаходиться невелика кількість внутрішніх об'єктів (предметів). На основі цього можна припустити, що простір у приміщенні заповнений менше 30 % або існує невелика кількість відбиваючих поверхонь. Такі умови можна зустріти у приміщеннях приватного, комунального, навчального секторів та ін. Результати експериментальних досліджень розподілу потужності сигналу на вході приймача за координатами приміщення (l, d) наведено на рис. 2.10.

Отримані результати показують, що основна енергія випромінювання сконцентрована на відстані двох метрів від ТД. Це є подібним до попередніх результатів, отриманих для діапазону 2,4 ГГц. Різниця між цією областю та подальшим розподілом, становить приблизно 10...20 дБм, враховуючи флуктуації сигналу. Якщо порівнювати із дослідженнями для діапазону 2,4 ГГц із однією та трьома антенами для 5 ГГц, то можна говорити про незалежність максимуму випромінювання від кількості використовуваних антен у радіоканалі, так як сумарний рівень випромінювання є сталим.

Існування трьох антен у ТД показує деякі особливості створення результуючого поля випромінювання у приміщенні. Отриманні поверхні показують, що антенна система має кращу діаграму спрямованості випромінювання за координатою l . В результаті цього, в розподілі спостерігаються три зони-смуги із вищим рівнем сигналу, що добре видно при

кутовому положенні ТД. Це говорить про те, що наявність декількох антен створює неоднорідну діаграму спрямованості, ефективність якої максимальна у площині розміщення антен.

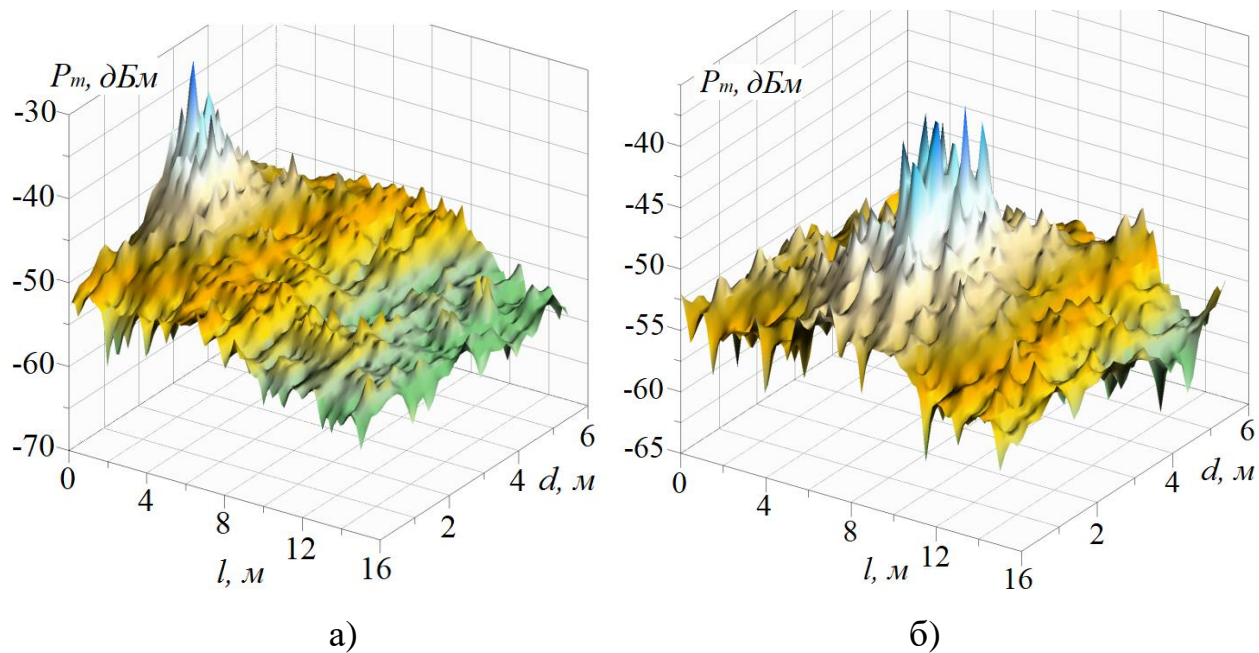


Рис. 2.10. Розподіл потужності сигналу для приміщення заповненого менше 30 %: а – для кутового положення ТД; б – для центрального положення ТД

При кутовому положенні точки доступу флуктуації сигналу становлять не більше ± 4 дБм в кутах приміщення, що є високим показником стабільності випромінюючої системи.

Інший випадок імітує приміщення, в якому існує велика кількість відбиваючих поверхонь або більше 30 % заповнення простору. До них можна віднести: навчальні приміщення із навчальним обладнанням, лабораторії, склади, магазини та ін. Результати експериментальних досліджень такого випадку, наведено на рис. 2.11.

Як видно із рис. 2.11, на розподілах спостерігаються досить значні флуктуації, особливо біля стін приміщення.

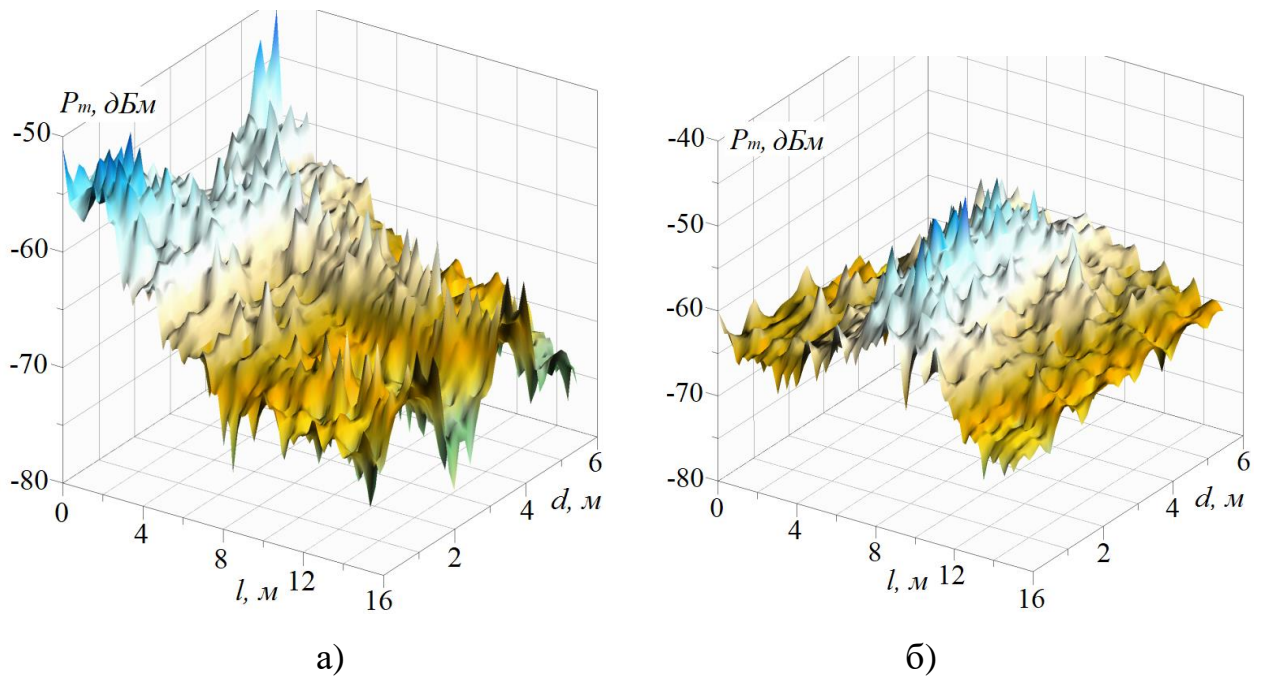


Рис. 2.11. Розподіл потужності сигналу для приміщення заповненого більше 30 %: а – для кутового положення ТД; б – для центрального положення ТД

Існування значних флуктуацій пояснюється створенням досить складної інтерференційної картини за рахунок великої кількості відбиваючих поверхонь. Наявність архітектурних перешкод у приміщенні забезпечують досить високий коефіцієнт флуктуацій, особливо біля стін. Крім того, на розподілі сигналу видно, що існує досить виражена вузько направлена складова діаграми спрямованості за координатою d .

Для розроблення моделей оцінювання основного енергетичного параметра, аналогічно до п. 2.1, застосуємо метод регресійного аналізу до отриманих результатів досліджень. Використовуючи умови отримання виразів (2.23) і (2.27) та використовуючи координату $(2+l/2; d/2)$, початкові рівні можна записати так:

$$\begin{cases} k = P_m - c \frac{l^2}{4} - 2cl - g \frac{l}{2} - 4c - 2g, \\ z = P_m - a \frac{d^2}{4} - b \frac{d}{2}. \end{cases} \quad (2.30)$$

Тоді узагальнену модель оцінювання просторового розподілу для частотного діапазону 5 ГГц можна записати так:

$$P_{Rx} = \frac{5}{8}(cl^2 + ad^2) + \frac{1}{4}(gl + bd) - c(l + 2) - g + P_m \pm \Delta P. \quad (2.31)$$

Запропонована модель дає можливість оцінювати потужність сигналу для будь-якого приміщення при положенні ТД за координатами $(l; d)$, та враховує всі фактори впливу, що існують у зоні покриття точки доступу.

На основі експериментальних досліджень можна визначити коефіцієнти затухання сигналу для всіх заданих умов досліджень. Для приміщення заповненого менше 30 % модель (2.31) прийме наступний вигляд:

– при кутовому положенні ТД:

$$P_{Rx} = -0,02l^2 - 0,2l \mp 0,2d \pm 0,2d - 0,25 - P_m; \quad (2.32)$$

– при центральному положенні ТД:

$$P_{Rx} = -0,08l^2 + l \mp 0,2d \pm 0,2d - 1,16 - P_m. \quad (2.33)$$

Для приміщення заповненого більше 30 % вираз (2.31) прийме наступний вигляд:

– при кутовому положенні ТД:

$$P_{Rx} = -0,04l^2 + 1,5l \mp 0,35d \pm 0,5d - 1,6 - P_m; \quad (2.34)$$

– при центральному положенні ТД:

$$P_{Rx} = -0,1l^2 + 1,5l \mp 0,55d \pm 0,5d - 1,7 - P_m. \quad (2.35)$$

Запропоновані моделі мають квадратичний характер та враховують параметри приміщення. Припустимо, що ТД знаходиться на початку координатної сітки. Тоді, в приміщенні із розмірами (l, d) початок координат ТД знаходиться в точці $(0, d/2)$ для кутового положення та $(l/2, d/2)$ – для центрального. Графічне представлення моделей (2.32) та (2.33) наведено на рис. 2.12.

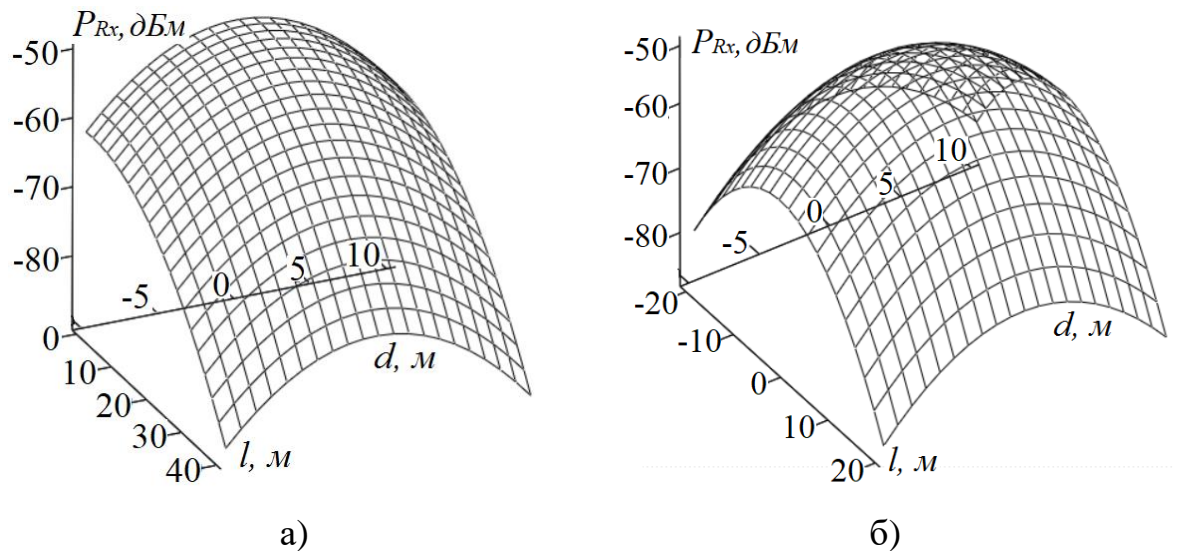


Рис. 2.12. Графічне представлення моделі розподілу потужності сигналу для приміщення заповненого менше 30 %: а – для кутового положення ТД; б – для центрального положення ТД

Графічне представлення виразів (2.36) і (2.37) наведено на рис. 2.13.

Отримані поверхні на рис. 2.12 і рис. 2.13 показують, що запропоновані моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача є справедливими для приміщень із розмірами l до 40 м та d до 20 м. Для коефіцієнтів a і b знак « \pm » вказує на існування максимумів та мінімумів для флуктуацій у просторовому розподілі, що можна побачити порівнюючи рис. 2.12, а та рис. 2.13, а.

Якщо враховувати фактор максимальної концентрації енергії біля ТД та використовувати довжину радіоканалу, то можна отримати логарифмічні залежності, які можна записати так:

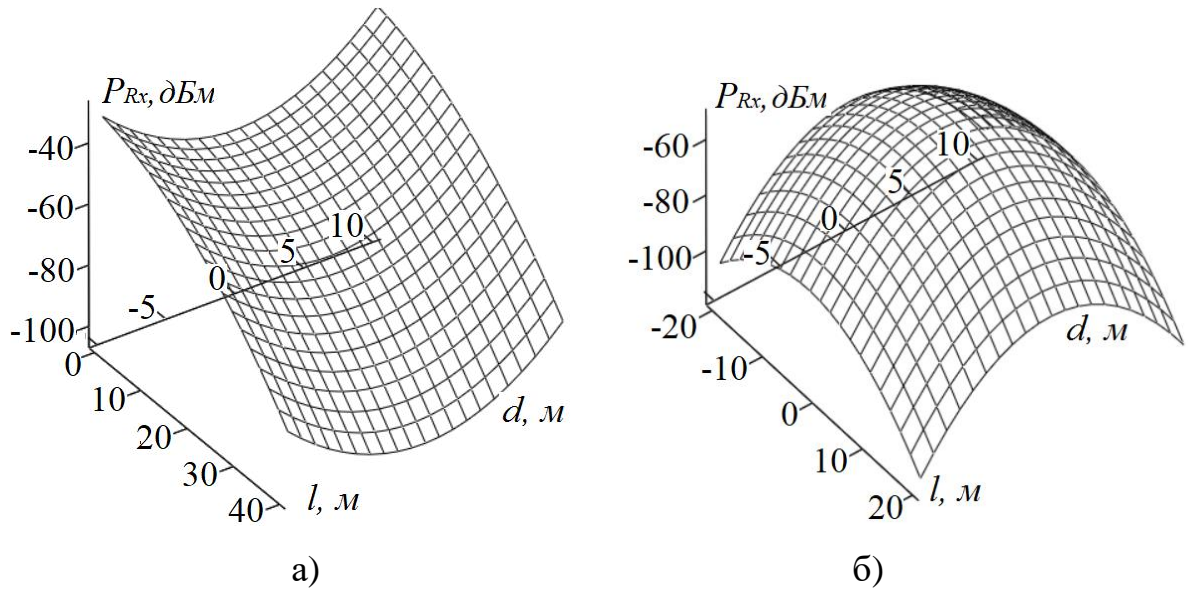


Рис. 2.13. Графічне представлення моделі розподілу потужності сигналу для приміщення заповненого більше 30 %: а – для кутового положення ТД; б – для центрального положення ТД

– для приміщення заповненого менше 30 %:

$$P_{Rx} = -4,5\ln(l) - 0,01l^2 - 0,1l + P_m + 8;$$

– для приміщення заповненого менше 30 %:

$$P_{Rx} = -6\ln(l) - 0,9l + P_m - 2.$$

Отримані залежності є подібними до відомих моделей затухання сигналу у радіоканалах (моделі вільного простору, Хатта, Уолфіш-Ікегамі та ін.) [17, 101]. Такі моделі є справедливими у будь-якому напрямку від ТД, але показують математичне очікування та не враховують флуктуації від об'єктів і архітектурних перешкод із високою густиною матеріалу в приміщенні.

2.4 Розроблення методу просторового оцінювання потужності сигналу на вході приймача

Розроблені моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача для будь-яких приміщень, дозволяють враховувати максимально-можливу кількість факторів впливу. Такі моделі є справедливими для будь-якого приймального пристрою стандартів 5G/Wi-Fi, за умови вибору коефіцієнтів затухання. Але використання запропонованих моделей потребує виконання ряду дій для отримання достовірного кінцевого результату. Тому, для ефективного просторового оцінювання потужності сигналу на вході приймача на основі можливостей приймальної частини спеціалізованого і абонентського обладнання та програмно апаратних засобів моніторингу було сформульовано метод, суть якого полягає в наступному.

На *першому етапі* виконується вимірювання потужності сигналу P_m на вході приймача з використанням програмно-апаратних засобів моніторингу абонентського пристрою. Середньостатистичне значення параметру P_m отримується на основі виразу (2.20) із періодом спостереження 360 с та часом моніторингу 1 с. Вимірювання виконується на відстані двох метрів від точки доступу за координатою l . Приклад такого моніторингу наведено на рис. 2.14.

На *другому етапі* визначаються коефіцієнти затухання c , g , a , b із врахуванням максимумів та мінімумів флуктуацій, що задаються інтервалами Δc , Δg , Δa , Δb . Ці коефіцієнти розраховуються із виразів (2.22).

Визначення меж зміни коефіцієнтів затухання є досить затратним у часі. Тому, було запропоновано використовувати значення отримані на основі проведених експериментальних досліджень для $h=1,5$ м, $h=0$ м та $h=3$ м. Для флуктуацій сигналу ΔP до 10 дБм, отримано інтервали зміни коефіцієнтів затухання для трьох параметрів h , які можна записати наступним чином.

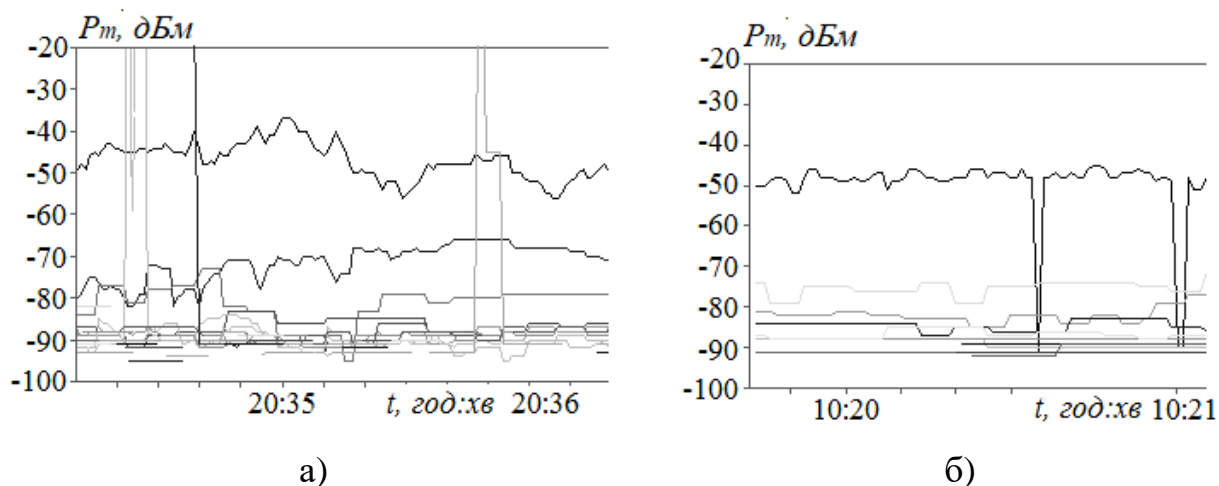


Рис. 2.14. Часовий розподіл потужності сигналу на вході приймача: а – із високим рівнем інтерференційних завад; б – із низьким рівнем інтерференційних завад

Для кутового положення ТД та діапазону 2,4 ГГц:

$$c = \begin{cases} 0,11 \pm 0,1 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 0, \\ 0,07 \pm 0,1 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 1,5, \\ 0,01 \pm 0,1 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 3; \end{cases}$$

$$g = \begin{cases} -3,5 \pm 2 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 0, \\ -2,5 \pm 2 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 1,5, \\ -1,5 \pm 1 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 3; \end{cases}$$

$$a = -0,5 \pm 1,5 \text{ (дБм/м)};$$

$$b = -2,5 \pm 7 \text{ (дБм/м)}.$$

Графічне представлення інтервалів зміни коефіцієнтів згасання за відповідною координатою приміщення для моделі (2.25) наведено на рис. 2.15.

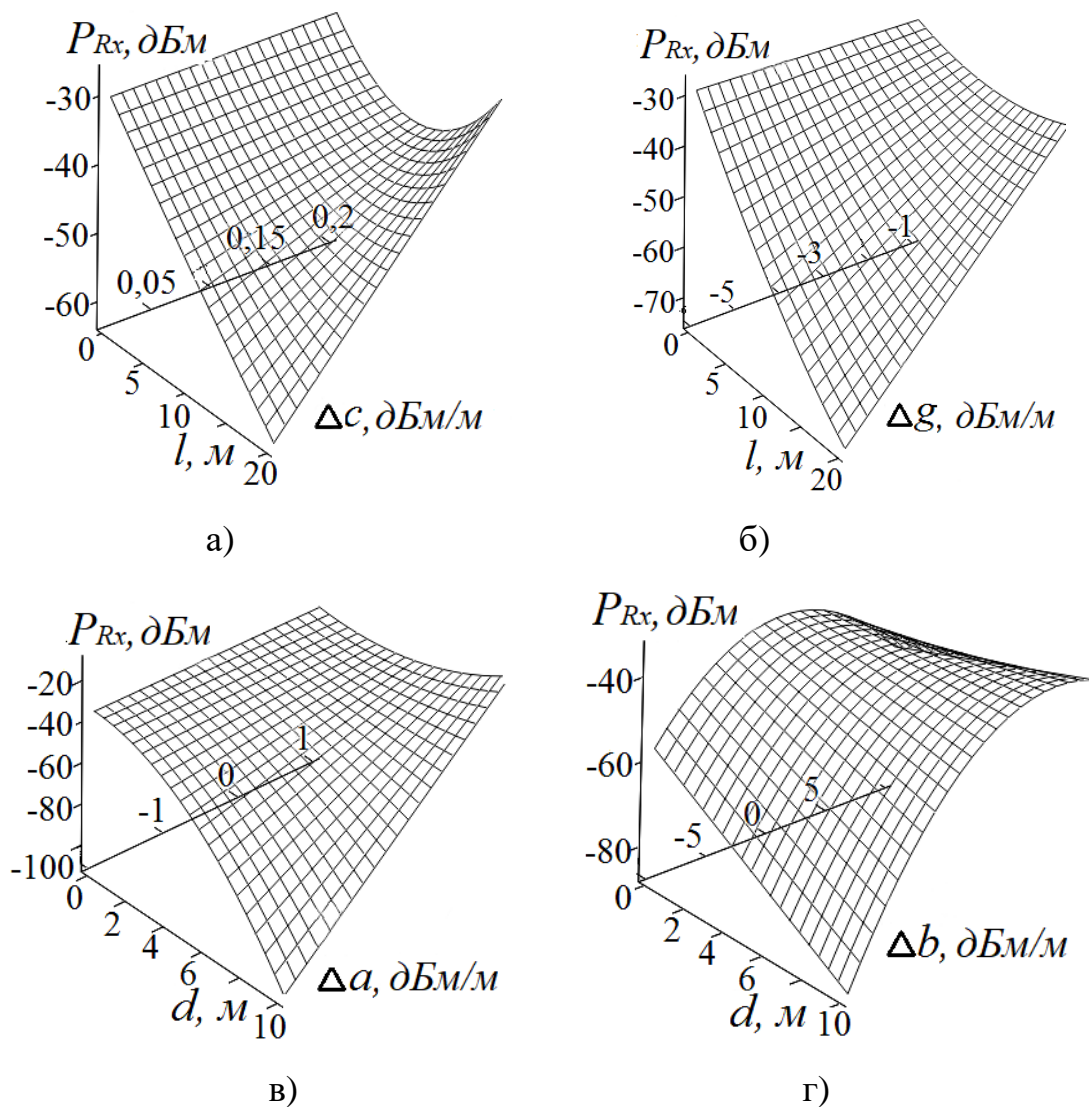


Рис. 2.15. Залежність потужності сигналу на вході приймача від інтервалів зміни меж коефіцієнтів затухання для кутового положення ТД: а – Δc ; б – Δg ; в – Δa ; г – Δb

Як видно із графіків на рис. 2.15, максимум або мінімум можна отримати із значень коефіцієнтів Δc , Δg , Δa , Δb , а саме від додатних або від'ємних значень. Збільшення відстані від ТД підвищує рівень флуктуацій сигналу. Характеристика затухання за координатою l показує майже лінійний характер затухання розподілу сигналу для умови $h=3\text{м}$.

Для центрального положення ТД та діапазону 2,4 ГГц отримано:

$$c = \begin{cases} -0,21 \pm 0,3 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 0, \\ -0,25 \pm 0,5 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 1,5, \\ -0,16 \pm 0,8 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 3; \end{cases}$$

$$g = \begin{cases} 3,8 \pm 0,5 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 0, \\ 4,5 \pm 1,5 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 1,5, \\ 3 \pm 1 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 3; \end{cases}$$

$$a = \begin{cases} -1 \pm 0,5 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 0, \\ 0 \pm 0,9 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 1,5, \\ -0,5 \pm 1,5 \text{ (дБм/м)}, & \text{при } h = 3; \end{cases}$$

$$b = 1 \pm 6 \text{ (дБм/м)}.$$

Графічне представлення для моделі (2.29) із врахуванням інтервалів відхилень коефіцієнтів затування, наведено на рис. 2.16.

Графіки показують, що в залежності від величини коефіцієнтів c і g можна говорити про існування перешкод у середовищі передачі та розрахунок рівня затувань, який вони вносять. Це дає можливість передбачувати місцезнаходження флуктуацій у приміщенні, якщо це є необхідним.

Для діапазону 5 ГГц використано інший підхід для розрахунку коефіцієнтів затування, де у випадку схожих результатів, показано тільки дослідження для умови $h=1,5\text{м}$, але із використанням наповненості приміщення перешкодами та відбиваючими поверхнями. В такому випадку, інтервали коефіцієнтів затування мають симетричність, тому, існування максимумів та мінімумів флуктуацій у просторовому розподілі визначається знаком « \pm » у моделях (2.32), (2.33), (2.34) і (2.35). З іншого боку така симетричність характеристик пояснюється відсутністю інтерференційних та шумових завад в діапазоні 5 ГГц на момент дослідження.

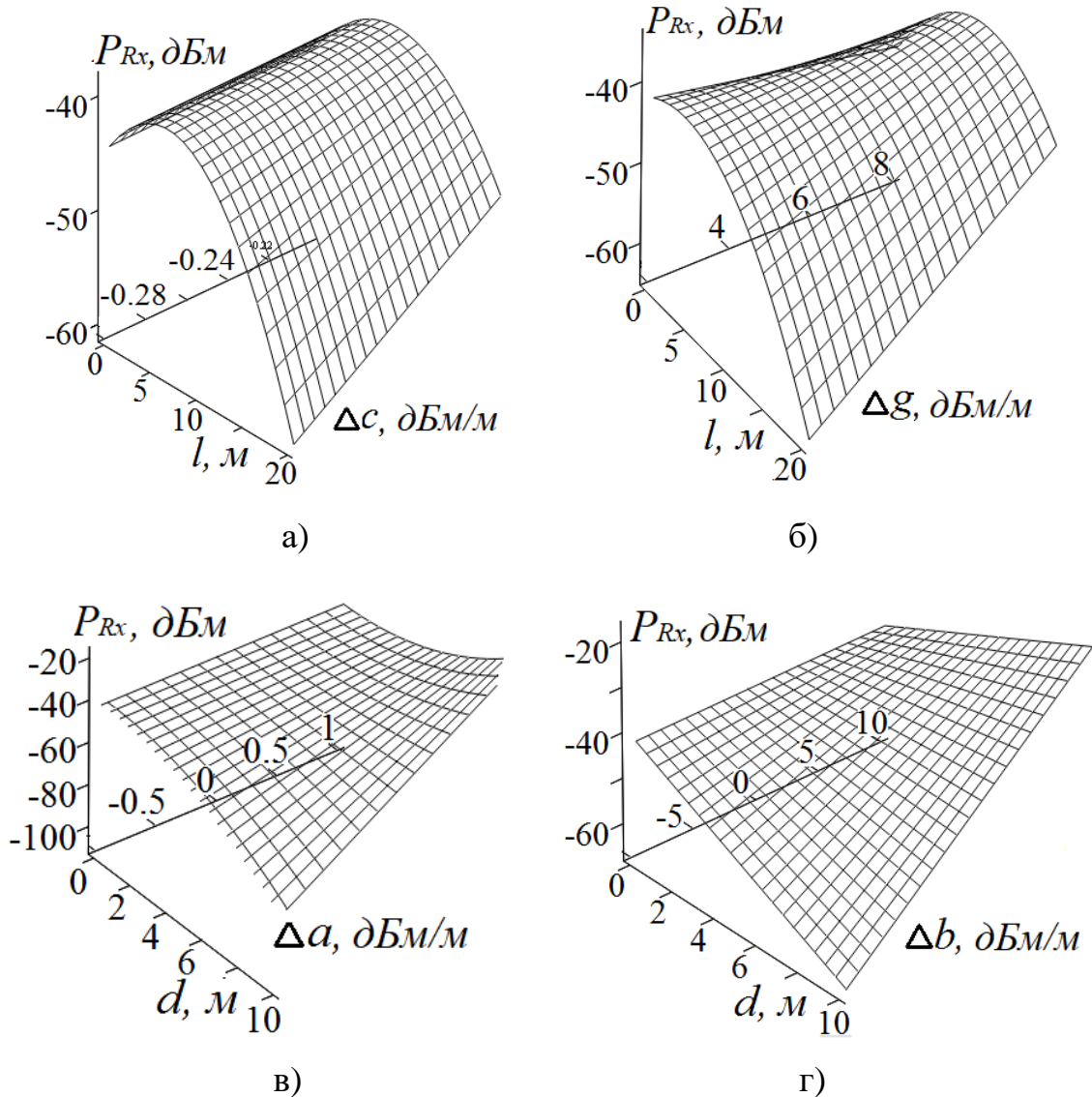


Рис. 2.16. Залежність потужності сигналу на вході приймача від інтервалів зміни коефіцієнтів затухання для центрального положення ТД: а – Δc ; б – Δg ; в – Δa ; г – Δb

На цьому етапі, додатково можна запропонувати умову вибору моделі оцінювання просторового розподілу сигналу на вході приймача. Як приклад, на основі результатів на рис. 2.14, можна визначити кількість інтерференційних завад, у середовищі передачі. Оскільки, отримані моделі оцінювання є подібними та мають квадратичний характер, то для високого рівня інтерференційних завад (див. рис. 2.14 а), можна використовувати моделі (2.25) і (2.29) для обох частотних діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц, а в противному випадку (див. рис. 2.14 б), доцільним є використання моделі (2.31).

На *третьому етапі* виконується розрахунок просторового розподілу потужності сигналу для приміщення за розробленими моделями оцінювання (2.25), (2.29) або (2.31), в залежності від необхідних умов із використанням координат приміщення (l, d).

На *четвертому етапі* враховуються межі флуктуацій потужності сигналу на вході приймача ΔP із врахуванням довірчого інтервалу. Результат оцінювання можна записати так:

$$P_m - \Delta P - \sigma < P_{Rx} < P_m + \Delta P + \sigma, \quad (2.36)$$

де σ – випадкова похибка оцінювання середньостатистичного значення потужності сигналу на вході приймача.

На основі експериментальних досліджень, можна вважати, що ΔP може складати до $\pm 2,5$ дБм від середньостатистичного параметра P_m для прямої видимості та до ± 5 дБм на відстанях до чотирьох метрів від відбиваючої поверхні. Похибка вимірювання складає не більше 0,25 дБм.

Величина параметра ΔP залежить від геометричних розмірів приміщення та коефіцієнта відбиття сигналу від поверхонь стін та об'єктів. Це враховується за допомогою параметрів $\Delta c, \Delta g, \Delta a, \Delta b$. Флуктуації сигналу є випадковим процесом, які мають значно більше значення чим випадкова похибка вимірювання. Для випадку кутового положення ТД у діапазоні 2,4 ГГц, графіки залежності розподілу потужності сигналу від рівня флуктуацій наведено на рис. 2.17.

Вплив флуктуацій сигналу для центрального положення ТД у діапазоні 2,4 ГГц, наведено на рис. 2.18.

Для частотного діапазону 5 ГГц рівень флуктуацій може складати до ± 4 дБм для приміщення заповненого менше 30 % та до ± 8 дБм для приміщення заповненого більше 30 %. Вплив флуктуацій на просторовий розподіл сигналу для частотного діапазону 5 ГГц, наведено на рис. 2.19.

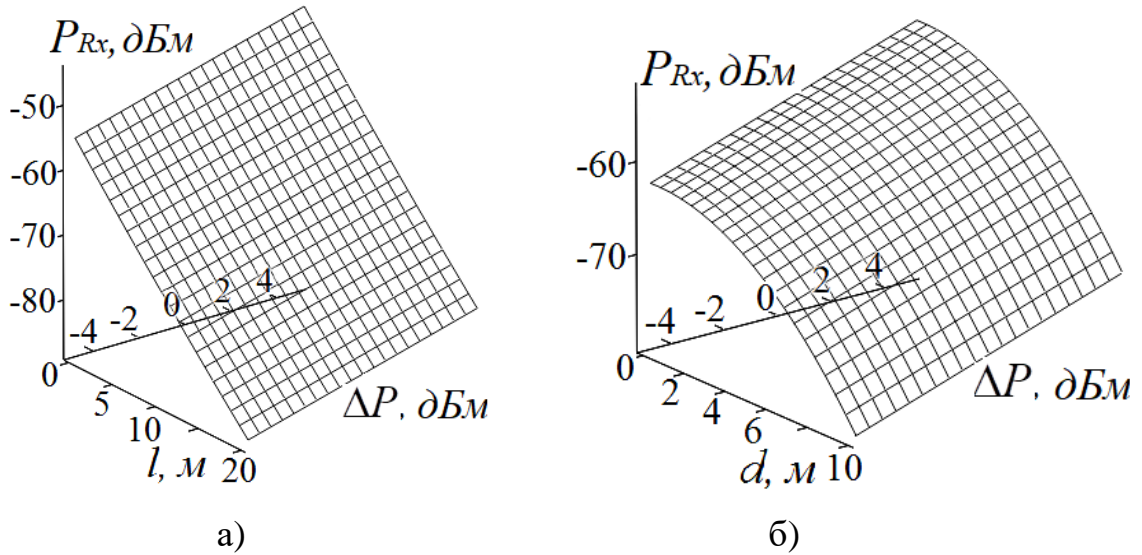


Рис. 2.17. Залежність потужності сигналу на вході приймача від рівня флуктуацій для кутового положення ТД в діапазоні 2,4 ГГц: а – для координати l ; б – для координати d

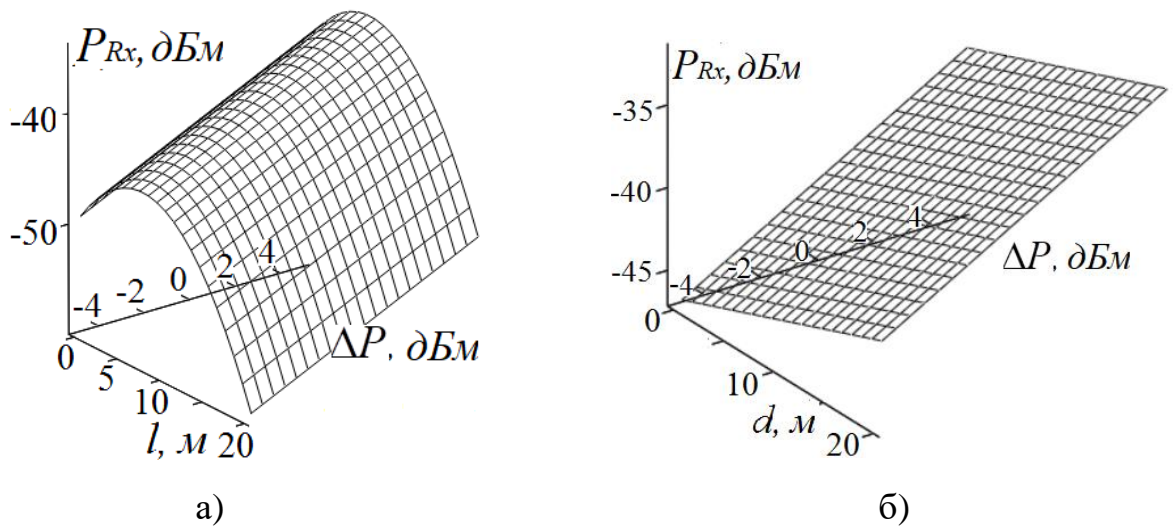


Рис. 2.18. Залежність потужності сигналу на вході приймача від рівня флуктуацій для центрального положення ТД в діапазоні 2,4 ГГц: а – для координати l ; б – для координати d

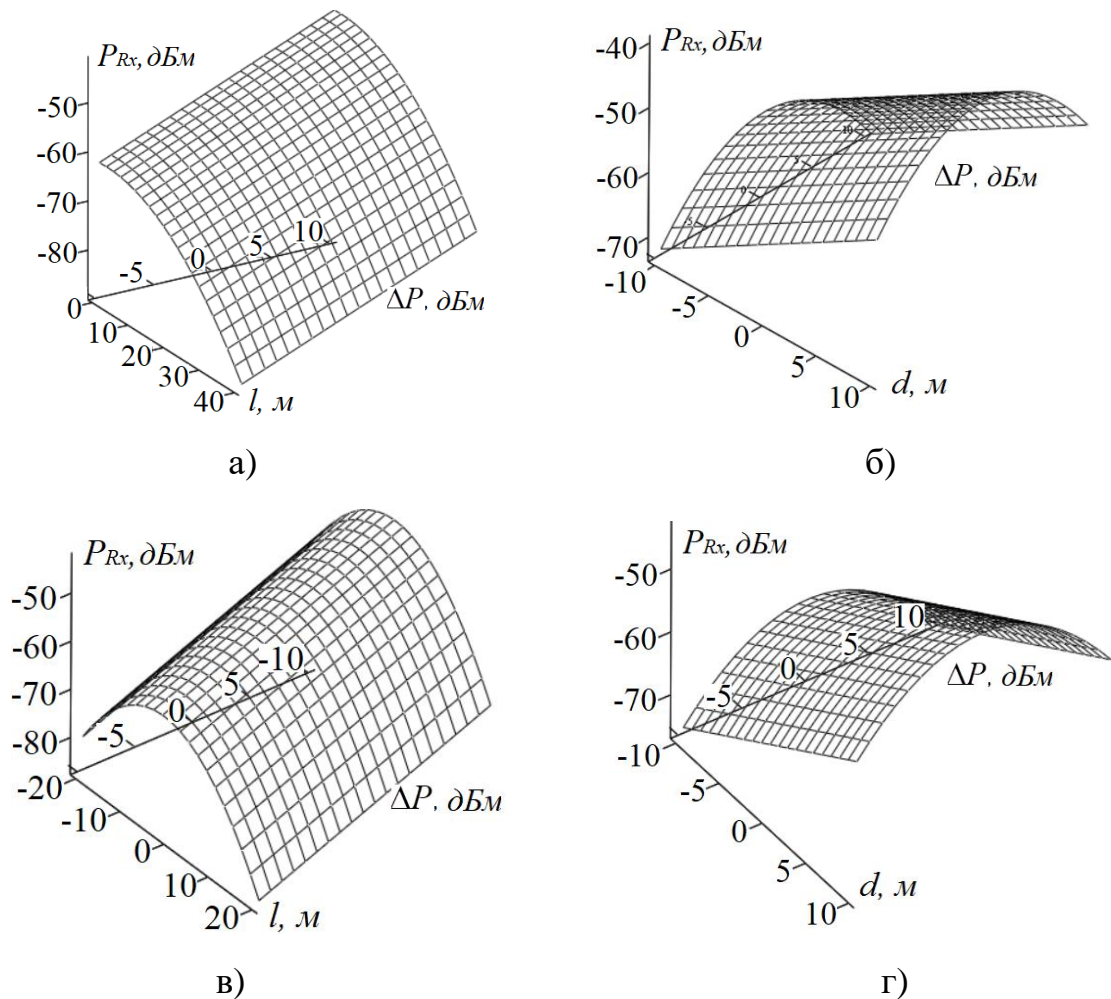


Рис. 2.19. Залежність потужності сигналу на вході приймача від флуктуацій для діапазону 5 ГГц: *а* – для координати l кутового положення ТД; *б* – для координати d кутового положення ТД; *в* – для координати l центрального положення ТД; *г* – для координати d центрального положення ТД

Із результатів на рис. 2.19, видно, що для частотного діапазону 5 ГГц, при значній довжині радіоканалу, виникають зони послаблення біля -80 дБм. Такий рівень є досить низьким, що є умовою на перехід радіоканалу у низькошвидкісний режим передачі інформації. Приклад оцінювання рівня флуктуацій відносно усередненого розрахунку розподілу сигналу у приміщенні, наведено на рис. 2.20.

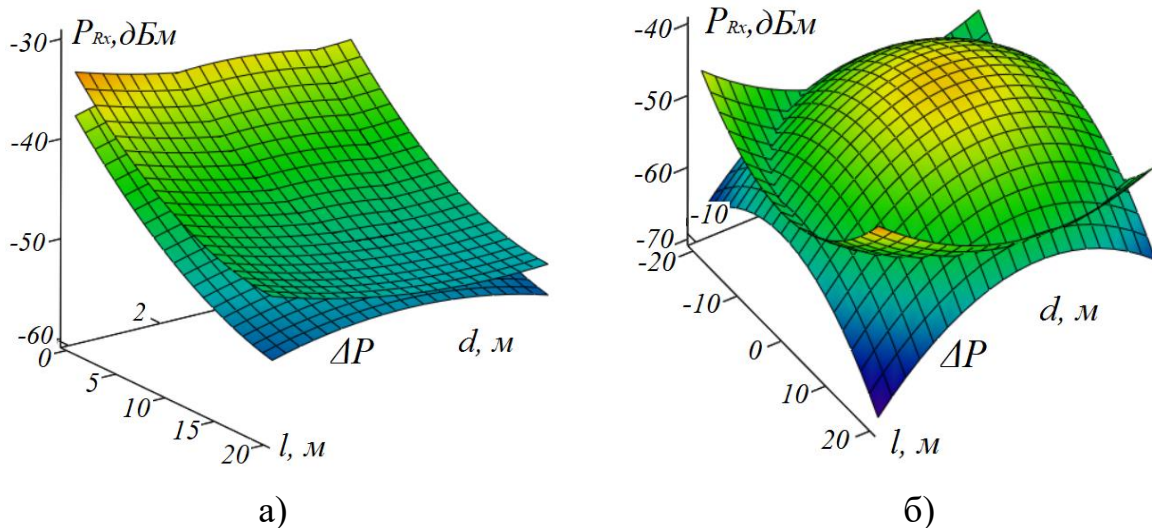


Рис. 2.20. Приклад оцінювання рівня флуктуацій розподілу сигналу: а – для кутового положення ТД та частотного діапазону 2,4 ГГц; б – для центрального положення ТД та частотного діапазону 5 ГГц

Додатково можна запропонувати *n'ятий етап* для визначення невідомих параметрів, які входять до теоретичної моделі радіоканалу. Для цього можна застосувати рівність між параметром P_{Rx} для теоретичних розрахунків та моделей оцінювання. Тоді для моделей (2.9) і (2.25), (2.29), (2.31) можна записати наступну рівність:

$$P_{Rx}^e \approx 10 \lg \frac{P_{Rx}^t}{P_0},$$

де P_{Rx}^e – потужність сигналу, яка отримана на основі моделей (2.25), (2.29) або (2.31); P_{Rx}^t – потужність сигналу, яка отримана із теоретичних розрахунків на основі моделі (2.9); P_0 – абсолютний нульовий рівень, який становить 1 мВт.

Метод є простим для реалізації та може використовуватись для будь-якого приймального пристрою з метою оцінювання покриття корпоративних телекомунікаційних мереж із врахуванням максимально-можливої кількості факторів впливу та для забезпечення неперервної оптимізації покриття мережі радіодоступу у приміщенні. До обмежень можна віднести корпоративні

приміщення із розміром 20x40 для кутового положення ТД або 20x20 для центрального положення ТД.

Призначення методу: Призначення методу: підвищення ефективності оцінювання потужності сигналу на вході приймача; знаходження максимально-можливого покриття мережі із врахуванням порогового значення рівня сигналу при якому інформаційні втрати будуть мінімальні; врахування внутрішніх і зовнішніх факторів впливу у корпоративних приміщеннях, можливість застосування для радіоканалів Wi-Fi та 5G.

Достовірність методу становить 0.997 для довірчого інтервалу $\pm 0,3$ дБм при $\Delta P = \pm 2$ дБм для мінімальної дії факторів впливу у приміщенні. Ступінь адекватності моделей оцінювання становить 0,95. Похибка оцінювання за таким методом буде залежати від двох складових: правильного вибору меж флуктуацій сигналу та похибки вимірювання абонентського обладнання.

До недоліків можна віднести період спостереження не менше 360 с та похибка оцінювання, яка становить до 15 % із врахуванням флуктуацій.

Висновки до розділу 2

У розділі, на основі теоретичних і експериментальних досліджень, запропоновано новий метод просторового оцінювання потужності сигналу на вході приймача для радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж на основі радіодоступу 5G/Wi-Fi для етапів неперервної оптимізації.

В результаті проведених досліджень отримано наступні наукові та практичні результати.

1. Отримала подальшого розвитку узагальнена математична модель радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж, яка враховує аналітичний зв'язок основних параметрів радіоканалу із зовнішніми та внутрішніми факторами впливу, а також дію багатопроменевого поширення хвиль у приміщеннях, що залежить від кількості поверхонь, інтерференційних завад та шумів.

2. Встановлено, що у просторовому розподілі сигналу у приміщенні, виникають ділянки підсилення та послаблення із флуктуаціями до $\pm 2,5$ дБм, а на відстанях до чотирьох метрів від відбиваючої поверхні – до ± 5 дБм. В найбільш складних умовах, біля кутів приміщення, флуктуації можуть досягати до ± 25 дБм, що приводить до переходу радіоканалу у низькошвидкісний режим або до втрати з'єднання. Запропоновано, враховувати рівень флуктуацій, як інтервал відхилення від математичного очікування вимірювального значення основного енергетичного параметра.

3. Встановлено, що неоднорідність розподілу сигналу пропорційно збільшується до кількості відбиваючих поверхонь у приміщенні та додатково підсилюється існуванням інтерференційних та шумових завад.

4. Розроблено моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача на основі експериментальних досліджень для частотних діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц, які враховують геометричні розміри приміщення, кутове і центральне положення точки доступу та інтервал флуктуацій, що дає можливість визначати значення розподілу сигналу безпосередньо у просторі приміщення за геометричними розмірами.

4. Для запропонованих моделей оцінювання досліджено зміну потужності сигналу на вході приймача від можливих інтервалів флуктуацій, що дає можливість оцінювати існування максимумів та мінімумів у просторовому розподілі, що в подальшому можна привести у відповідність до флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації. Дослідження показало, що підвищення достовірності оцінювання основного енергетичного параметра забезпечується на основі збільшення періоду спостереження, врахування параметрів приміщення та зовнішніх і внутрішніх факторів впливу.

5. Запропоновано метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача, який враховує процеси поширення сигналів та внутрішні і зовнішні фактори впливу в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для забезпечення неперервної оптимізації покриття мережі радіодоступу у приміщенні із мінімальними інформаційними втратами.

6. Отримано коефіцієнти просторових розподілів потужності сигналу на вході приймача для приміщень при кутовому та центральному положенні точки доступу в діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц, що дало змогу враховувати та прогнозувати дію статичних і випадкових факторів впливу, а також існування додаткових флуктуацій біля стін приміщення.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ТА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ У РАДІОКАНАЛАХ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

3.1 Розроблення узагальненої математичної моделі радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж

В ідеальному випадку, пропускну здатність радіоканалу можна розглядати, як кількість отриманих кадрів на приймальній стороні за одиницю часу. В реальних умовах, при існуванні завад, перешкод, затримок і шумів у тракті передачі, в кадрах з'являються помилки, що потребує внесення додаткової керуючої інформації та механізму повторної передачі. Тому, пропускну здатність вказує на швидкість проходження всієї інформації у радіоканалі за одиницю часу. Ефективна швидкість передачі інформації показує кількість корисної інформації, яку було отримано за одиницю часу після всіх етапів проходження кадру і пакету. З точки зору оцінювання вказаних параметрів, спершу, є доцільним побудувати математичну модель радіоканалу на основі критерію ефективності передачі інформації на основі параметрів специфікацій стандартів. Для цього, застосуємо структуру радіоканалу на основі методу передачі даних із керуючим зворотним зв'язком, де використовується повторна передача інформаційного кадру при появі помилки [263]. Враховуючи аналіз в розділі 1, ефективність передачі інформації у радіоканалі можна визначити на основі коефіцієнту, який можна записати так:

$$K_{eff} = \frac{V_{eff}}{V_{pl}}, \quad (3.1)$$

де V_{eff} – ефективна швидкість передачі інформації; V_{pl} – максимальна пропускну здатність радіоканалу, яка визначається швидкістю перетворення кадрів у бітову послідовність на фізичному рівні.

Ефективна швидкість передачі інформації – це певна кількість інформації v , яка передається у радіоканалі за визначений проміжок часу t . Тоді, враховуючи вираз (1.10), отримаємо:

$$V_{eff} = \frac{v}{t}. \quad (3.2)$$

Канальний рівень, в залежності від стандарту системи передачі, поділяє інформацію на кадри. Тоді, кількість інформації можна визначити як:

$$v = N_{\kappa} L_{\kappa}, \quad (3.3)$$

де N_{κ} – кількість кадрів; L_{κ} – довжина кадру.

Час передачі інформації в радіоканалі визначається на основі циклу передачі кадрів. Враховуючи помилки у прийнятих кадрах та їх повторну передачу, час передачі кадрів можна розрахувати за виразом:

$$t = (t_{\kappa} + t_{\text{з}})(N_{\kappa} + N_{\kappa.n}), \quad (3.4)$$

де t_{κ} – час передачі кадру; $t_{\text{з}}$ – час передачі службової інформації із врахуванням циклу передачі кадру; $N_{\kappa.n}$ – кількість кадрів, отриманих із помилками, для яких виконується перезапит.

Кадри із помилками збільшують кількість надлишкової інформації, за рахунок створення додаткових циклів передачі в радіоканалі. Їх можна виразити через імовірність появи бітової помилки. Тоді вираз (3.4) набуде наступного вигляду:

$$t = N_{\kappa} (t_{\kappa} + t_{\text{з}})(1 + P), \quad (3.5)$$

де P – імовірність прийому кадру із помилкою.

В напівдуплексних системах, передача пакета здійснюється у два етапи: створюється запит на передачу пакету по прямому Tx каналі та отримання підтвердження прийому по зворотному Rx . Тоді, враховуючи [56], час затримки для одного циклу передачі кадру можна розрахувати так:

$$t_3 = t_{Tx} + t_{Rx} = \frac{L_{Tx} + L_{Rx}}{V_{pl}} + 2t_u. \quad (3.6)$$

де t_{Tx} – час передачі кадру запиту на передачу; t_{Rx} – час отримання кадру підтвердження успішної передачі інформаційного кадру; L_{Tx} і L_{Rx} – довжини кадрів запиту та підтвердження; t_u – час затримки між кадрами циклу передачі, що визначається технічними особливостями відповідного стандарту.

Підставляючи (3.6), (3.4) і (3.5) в (3.2) і враховуючи цикл передачі інформаційного кадру та затримку в радіоканалі, ефективну швидкість передачі інформації можна розрахувати за наступним виразом:

$$V_{eff} = \frac{N_k L_k}{\left(t_k + \frac{L_{Tx} + L_{Rx}}{V_{pl}} + 2t_u \right) (N_k + N_{k.n})} = \frac{L_k}{\left(t_k + \frac{L_{Tx} + L_{Rx}}{V_{pl}} + 2t_u \right) (1 + P)}. \quad (3.7)$$

З урахуванням (3.6), коефіцієнт ефективності радіоканалу (3.1) можна представити як:

$$K_{eff} = \frac{L_k}{(1 + P)((t_k + 2t_3)V_{pl} + L_{Tx} + L_{Rx})}. \quad (3.8)$$

Вираз (3.8) є узагальненою математичною моделлю, яка є справедливою для будь-якого радіоканалу 5G/Wi-Fi, враховує механізм повторної передачі кадрів із імовірністю появи помилок.

Пропускню здатність радіоканалу виразимо через потужність сигналу на вході приймача. Враховуючи вираз (1.4) і роботи [101] та [265], отримаємо:

$$V_{pl} = \Delta F \log_2 \left(\frac{P_{Rx}}{(P_{uu} + P_i)} + 1 \right). \quad (3.9)$$

де P_{Rx} – потужність сигналу на вході приймача; P_{uu} – рівень шумів у радіоканалі; P_i – рівень інтерференційних завад; ΔF – смуга частотного каналу;

Враховуючи [266], що сигнал/шум, це відношення енергії сигналу E для передачі одного біту інформації до густини потужності шумів, тоді має місце наступний вираз:

$$\frac{E_{\delta}}{N_0} = \frac{P_{Rx}}{(P_{uu} + P_i)} \cdot \frac{\Delta F}{V_{eff}}, \quad (3.10)$$

де N_0 – потужність білого шуму у радіоканалі; E_{δ} – енергія для передачі одного біту інформації.

Підставляючи (3.10) у (3.9), отримаємо:

$$V_{pl} = \Delta F \log_2 \left(\frac{V_{eff} E_{\delta}}{\Delta F N_0} + 1 \right). \quad (3.11)$$

Вирази (3.9) і (3.11) показують функціональний зв'язок між основними параметрами радіоканалу: ефективною швидкістю передачі інформації, пропускною здатністю та потужністю сигналу на вході приймача.

Проведемо аналіз загальної моделі коефіцієнту ефективності радіоканалу від зміни основних параметрів: потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації. Якщо, у модель (3.8) підставити вираз (3.9), то можна оцінювати енергетичну ефективність радіоканалу, а якщо вираз (3.11) – інформаційну. Використання імовірності бітової помилки при значеннях $10^{-6} \dots 10^{-5}$ є малоефективним для реальних умов роботи радіоканалу, оскільки, в більшості випадків, поява факторів впливу є випадковим процесом. Тому, для досліджень моделі використано параметр імовірності надходження кадру із помилкою, де P

прямує до одиниці, при якій створюється умова повторного циклу передачі. Аналогічно, розглядати залежність моделі від розміру пакета є недоцільним, оскільки, як правило він в більшості випадків є фіксованим. На основі вище сказаного, проведено математичне дослідження запропонованої моделі радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж (3.8) із врахуванням виразів (3.9) і (3.11). Початкові умови досліджень обрано на основі можливостей стандарту Wi-Fi. Результати наведено на рис. 3.1.

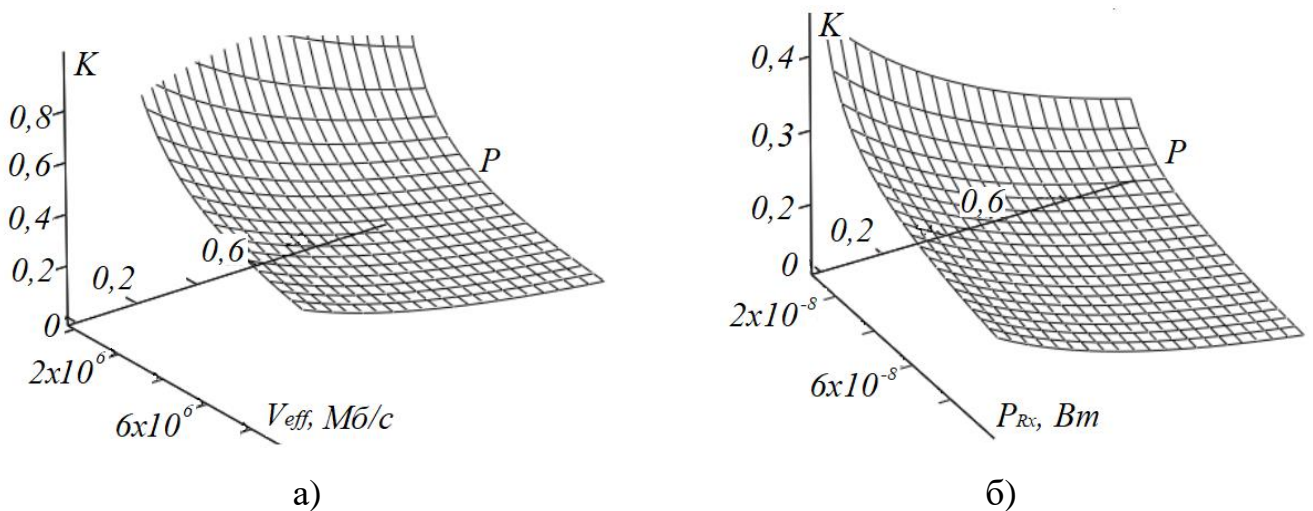


Рис. 3.1. Залежність коефіцієнту ефективності радіоканалу від: а – потужності сигналу на вході приймача; б – ефективної швидкості передачі інформації

Аналіз отриманих результатів показує, що збільшення ефективної швидкості передачі інформації зменшує інформаційну ефективність радіоканалу в умовах існування факторів впливу, так як збільшується імовірність появи кадрів із помилками. Одним із способів зменшення помилок у пакетах є підвищення рівня потужності на вході приймача, що виконується оптимізацією покриття мережі. Виявлено залежність енергетичної ефективності від смуги частотного каналу, на відміну від інформаційної, що говорить про те що, використання радіоканалу із більшою смугою частот потребує меншого рівня потужності випромінювання передавача.

З точки зору прикладного рівня та забезпечення високої якості обслуговування, цікавить процес обміну інформацією без змін та перетворень [267] з мінімальною кількістю втрат кадрів. Тоді, цикли передачі кадрів по радіоканалу можна розділити на два етапи. Розглянемо їх на основі повного циклу передачі блоку інформації DU (Data Unit) між додатками прикладного рівня, схема якого наведена на рис. 3.2.

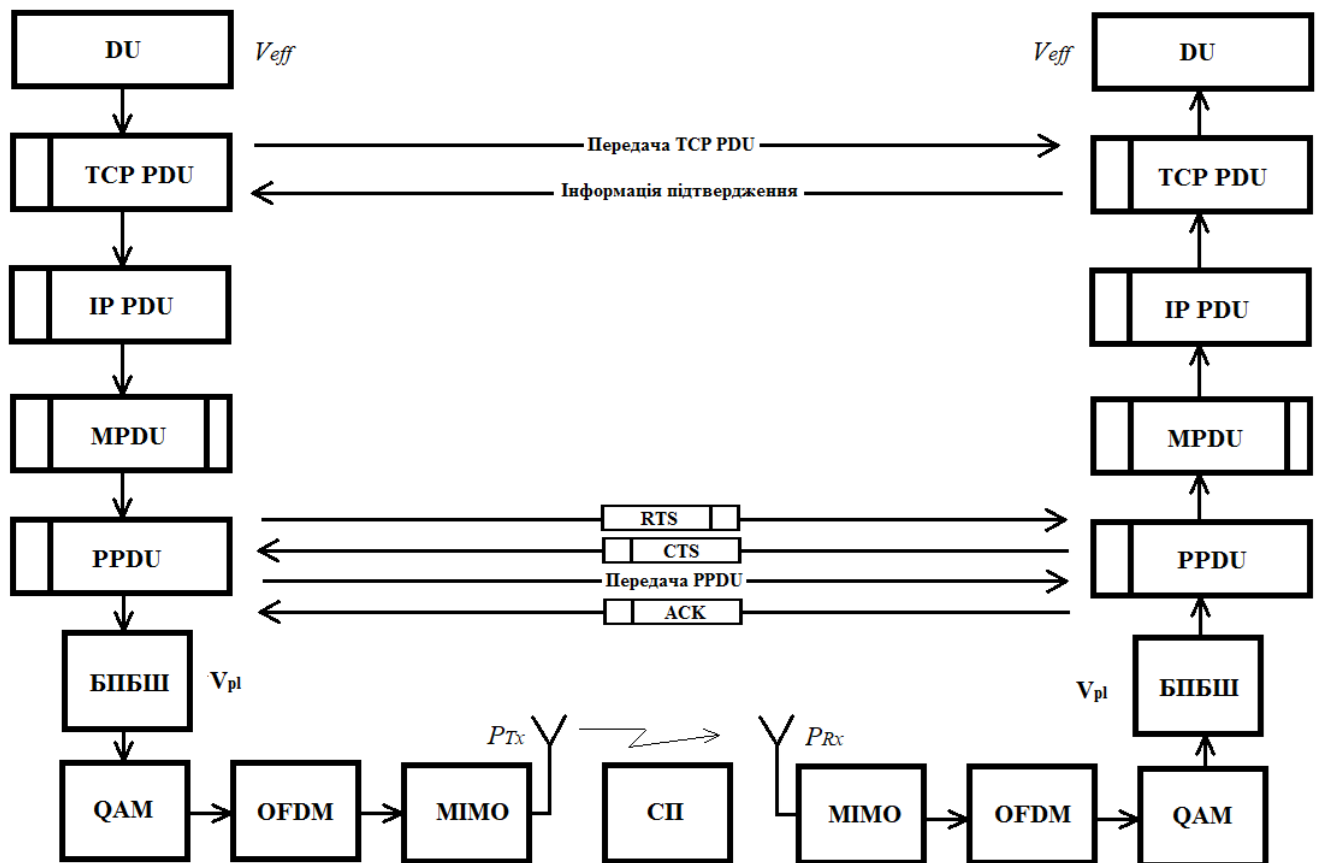


Рис. 3.2. Схема одного циклу передачі блоку DU

Перший етап передбачає формування блоків даних DU та передачу їх у віртуальному каналі. Саме DU є корисною інформацією, з якою працюють додатки прикладного рівня. Довжину DU можна задати параметром L . Час проходження DU по тракту передачі від одного додатку до іншого за одиницю часу буде визначати ефективну швидкість передачі інформації. Для передавання такого блоку в каналах використовуються пакети PDU (Protocol Data Unit), в яких міститься службова інформація протоколу передачі. Найбільш поширеним є стек

протоколів TCP/IP, що додає службову інформацію до DU, яку можна задати довжинами $L_{c.TCP}$ та $L_{c.IP}$. Протокол TCP має дуплексний режим передачі пакетів із механізмом контролю надійності [268]. Це передбачає посилення в зворотному напрямку службової інформації підтвердження прийому пакету, і при наявності помилки виконується запит на повторну передачу.

Таким чином, кількість інформації за цикл передачі пакету можна розрахувати так:

$$L_{TCP/IP} = L + L_{c.TCP} + L_{c.IP}. \quad (3.12)$$

Другий етап передбачає передачу пакету даних через середовище передачі (СП) за допомогою програмно-апаратних засобів радіоканалу, що описуються каналним та фізичним рівнями [269]. Далі пакет даних передається за допомогою внутрішньої інформаційної одиниці, що має назву кадр.

Розмір кадрів на каналному рівні підлаштовуються під розмір пакетів PDU і є справедливою рівність $L_{TCP/IP} = L_{MSDU}$. На MAC підрівні до MSDU додається службова інформація, що формує кадри MPDU. Тоді, враховуючи (3.12), кількість інформації у одному кадрі можна записати так:

$$L_{MPDU} = L_{c.MPDU} + L_{MSDU} = L + L_{c.MPDU} + L_{c.TCP/IP}. \quad (3.13)$$

де $L_{c.MPDU}$ – довжина службової інформації у кадрі MPDU; L_{MSDU} – довжина кадру MSDU.

Для передачі MPDU у радіоканалі формуються кадри каналного рівня PPDU. Такі кадри містять службову інформацію для апаратної частини тракту. При цьому необхідно враховувати цикл передачі RTS/CTS та агрегацію [220]. Рационально враховувати агрегацію AMPDU, як таку що застосовується безпосередньо на MAC-підрівні. Агрегація AMSDU є недоцільною, оскільки, при наявності незначної дії факторів впливу, створює велику кількість помилок у

кадрах для високошвидкісних режимів. Тоді для AMPDU, кількість інформації, із врахуванням циклу передачі, розраховується так:

$$V_c = L_{RTS} + L_{c.PPDU} + mL_{MPDU} + L_{CTS} + L_{ACK}, \quad (3.14)$$

де L_{RTS} – довжина RTS кадру; $L_{c.PPDU}$ – службова інформація PPDU кадру, що включає преамбулу та заголовок; L_{CTS} – довжина CTS кадру; L_{ACK} – довжина кадру підтвердження; m – кількість MPDU кадрів в агрегованому кадрі AMPDU.

Час необхідний для передачі такої кількості інформації в радіоканалі із врахуванням службової інформації та затримок для повного циклу передачі кадру MPDU, можна розрахувати за наступним виразом:

$$t_c = t_{Difs} + t_{BO} + t_{RTS} + t_{Sifs} + t_{CTS} + t_{Sifs} + t_{MPDU} + t_{Sifs} + t_{ACK} + 2t_{zc}, \quad (3.15)$$

де t_{BO} – затримка вибору часових слотів для запобігання колізій; t_{Difs} , t_{Sifs} – міжкадрова затримка та мала міжкадрова затримка; t_{RTS} – час передачі RTS кадру; t_{CTS} – час передачі CTS кадру; t_{MPDU} – час передачі MPDU кадру; t_{ACK} – час передачі ACK кадру; t_{zc} – час затримки проходження сигналу.

Якщо враховувати стандарт Wi-Fi, то згідно специфікації [268], затримка вибору часових слотів визначається так:

$$t_{BO} = random(0, CW \min) \cdot T_{st}, \quad (3.16)$$

де $random()$ – випадкова функція вибору розміру вікна конфлікту, для запобігання перевантаження та колізій у радіоканалі; T_{st} – довжина часового відрізка у схемі CSMA/CA.

Час передачі інформаційного кадру становить:

$$t_{MPDU} = t_{c.PPDU} + \frac{m \cdot L_{MPDU}}{V_{pl}}, \quad (3.17)$$

де $t_{c.PPDU}$ – службова інформація, що містить преамбулу та заголовок фізичного рівня.

Час передачі кадрів RTS, CTS і ACK визначається так [268]:

$$t_{RTS} = t_{c.PPDU} + \frac{L_{RTS}}{V_{pl}}, \quad (3.18)$$

$$t_{CTS} = t_{c.PPDU} + \frac{L_{CTS}}{V_{pl}}, \quad (3.19)$$

$$t_{ACK} = t_{c.PPDU} + \frac{L_{ACK}}{V_{pl}}. \quad (3.20)$$

Крім затримок формування та передачі кадрів, також існують затримки, пов'язані із формуванням та передачею сигналу у середовищі. Після перетворення кадру PPDU у бітову послідовність у БПБШ (блок перетворення у бітову швидкість) можна виділити певну групу апаратних затримок, сума яких становить:

$$t_{zc} = t_{QAM}^{Tx} + t_{OFDM}^{Tx} + t_{MIMO}^{Tx} + t_{cn} + t_{QAM}^{Rx} + t_{OFDM}^{Rx} + t_{MIMO}^{Rx} + 2t_{PMD}, \quad (3.21)$$

де t_{QAM}^{Tx} – затримка в модуляторі передавача; t_{OFDM}^{Tx} – затримка на формування OFDM; t_{MIMO}^{Tx} – затримка на формування просторових потоків MIMO; t_{cn} – затримка проходження сигналу у середовищі передачі; t_{MIMO}^{Rx} – затримка на об'єднання просторових потоків MIMO; t_{OFDM}^{Rx} – затримка на зворотне перетворення OFDM; t_{QAM}^{Rx} – затримка в демодуляторі приймача; t_{PMD} – затримка на перетворення кадру на бітову послідовність на підрівні PMD.

Враховуючи довжину корисної інформації у циклі (3.14) та час її проходження в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж (3.15), то вираз (3.8) набуде наступного вигляду:

$$K_{eff} = \frac{m(L_{MSDU} - L_{c.TCP/IP})}{(t_{Difs} + t_{BO} + 3t_{Sifs} + 4t_{c.PPDU} + t_{zc})V_{pl} + L_{RTS} + L_{CTS} + mL_{MPDU} + L_{ACK}}. \quad (3.22)$$

Отриманий вираз є узагальненою математичною моделлю радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, та може використовуватись для стандартів 5G і Wi-Fi і дає можливість оцінювати ефективність передачі блоку інформації DU при відсутності помилок у кадрах.

В реальних умовах, при існуванні факторів впливу, кількість отриманих кадрів із помилками може бути значною навіть в межах прямої видимості. Збільшення кадрів із помилками збільшує кількість службової інформації у радіоканалі (помилки можуть виникати і у пакетах PDU), за рахунок створення додаткових сеансів повторної передачі пакету або кадру. Це в свою чергу додає додаткові затримки у радіоканалі. Тоді, кількість можливої інформації у стеку протоколів TCP/IP, при появі помилок у віртуальному каналі, буде становити:

$$L_{TCP/IP} = L + L_{c.TCP} + L_{c.IP} + \sum_{i=1}^n (L + L_{c.TCP} + L_{c.IP})_i. \quad (3.23)$$

де n – кількість циклів повторного пересилання пакету при виникненні помилок.

В радіоканалах існує механізм визначення кількості запитів повторної передачі для вдало прийнятих та отриманих кадрів, де запит на повторну передачу відсилався більше одного разу. Тоді, кожен цикл повторної передачі кадру можна розглядати як передача інформаційного кадру MPDU із використанням циклу RTS/CTS, за який буде передано певне число кадрів без помилок N_k та число кадрів із помилками $N_{k,n}$. Враховуючи вирази (3.4) і (3.5),

коефіцієнт ефективності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж із врахуванням кадрів із помилками можна записати так:

$$K_{eff.n} = \frac{N_{\kappa}}{N_{\kappa} + N_{\kappa.n}} K_{eff}. \quad (3.24)$$

Кількість кадрів із помилкою можна визначити через імовірність бітової помилки [266]. Тоді, імовірність прийому кадру із помилкою задамо наступним виразом:

$$P = 1 - (1 - p)^{v_c}. \quad (3.25)$$

Враховуючи (3.5) і (3.25), вираз (3.24) можна записати так:

$$K_{eff.n} = \frac{K_{eff}}{2 - (1 - p)^{v_c}}. \quad (3.26)$$

Отриманий вираз враховує передачу кадру для сеансів індивідуальної передачі кадрів по радіоканалу при існуванні у мережі однієї активної пари передавач-приймач.

Корпоративні телекомунікаційні мережі призначені для обслуговування значної кількості абонентських пристроїв та пристроїв IoT, але обмін кадрами відбувається із використанням фізичного ресурсу одного частотного каналу. Для сумісного використання такого каналу, використовується механізм боротьби за частотний ресурс CSMA/CD та часові інтервали t_{BO} і t_{Difs} . Тоді, при існуванні декількох абонентів у мережі, кожен з них виконує сканування середовища на наявність вільного часового слоту. При існуванні у мережі активного циклу передачі RTS/CTS абонент знаходиться в режимі очікування. Тому, для окремого абонента ефективність буде зменшуватись за рахунок затримок очікування і фізичний ресурс частотного каналу буде розподілятися між абонентами із певною

імовірністю. Тоді вираз (3.26), із врахуванням кількості абонентів у мережі, можна записати так:

$$K_{eff} = \frac{m(L_{MPDU} - L_{c.MPDU} - L_{c.TCP/IP})}{2 - (1 - p)^{v_c} \sum_{i=1}^k \gamma_i ((t_{RTS/CTS} + t_{ck})V_{pl} + L_{RTS} + L_{CTS} + mL_{MPDU} + L_{ACK})}, \quad (3.27)$$

де t_{ck} – час сканування абонентом часового слоту; γ_i – імовірність надходження кадру від k -го абонента у мережі.

При імовірності надходження кадрів від кожного абонента $\gamma_i=1$, отримаємо максимально можливий випадок боротьби за фізичний ресурс частотного каналу. Такий випадок, можна використовувати при експериментальних дослідженнях для оцінювання стабільності радіоканалу при існуванні інших абонентів у мережі [86, 102, 105, 112].

Проведемо дослідження та аналіз отриманих моделей на основі специфікацій радіоканалу Wi-Fi. Для цього було обрано Результати математичного дослідження для моделей (3.22) і (3.27), із врахуванням високопродуктивного режиму та агрегації кадрів, наведено на рис. 3.3.

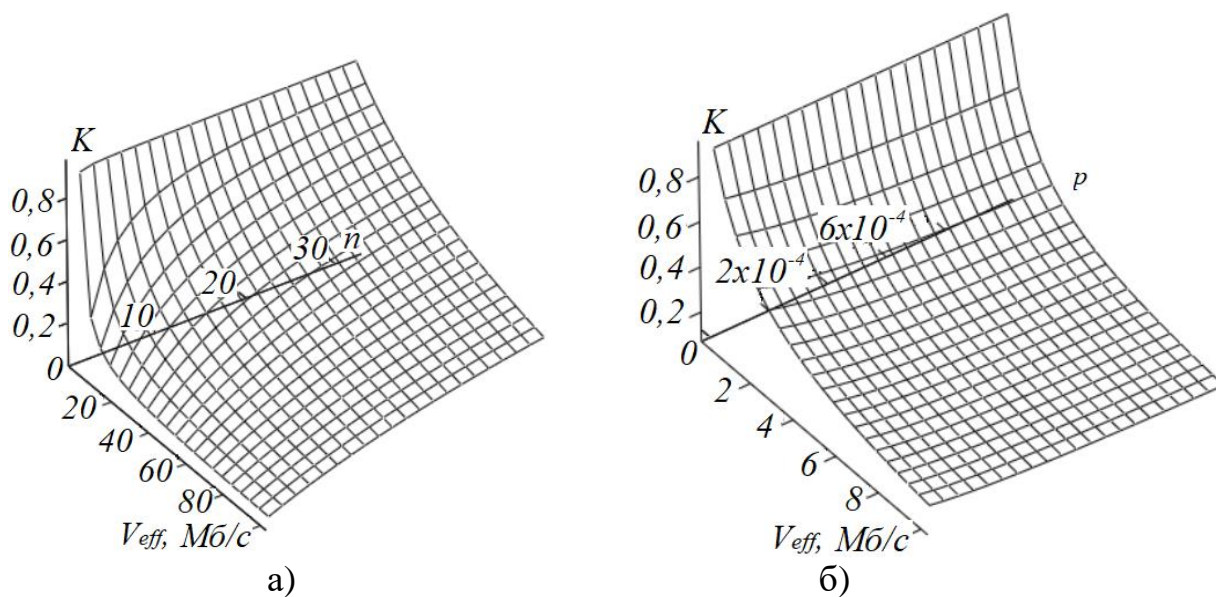


Рис. 3.3. Залежність ефективності радіоканалу від: а – агрегації кадрів; б – кількості кадрів із помилками

Для стандарту Wi-Fi, агрегація кадрів підтримується починаючи із стандарту 802.11n, та є обов'язковою для високопродуктивних режимів у стандарті 802.11ac. Максимальна кількість агрегованих кадрів MPDU може досягати 32. Але, як правило, агрегований кадр AMPDU містить 8 MPDU кадрів. Аналіз результатів моделювання показує, що вісім кадрів є найбільш оптимальним режимом. З іншого боку, при дії факторів впливу виникають помилки у кадрах, що значно зменшує ефективність радіоканалу. Це робить агрегацію досить чутливою, що досить добре видно в результатах експериментальних досліджень для стандарту 802.11ac в роботах [86–87].

Далі розглянемо математичні дослідження ефективності радіоканалу при наявності інших абонентів у мережі. Для цього, задамо максимально навантажений режим роботи мережі, в якому в один і той же час кожен абонент є активним та формує кадри MSDU ($\gamma_i=1$). Припустимо, що, в середньому, точка доступу може підтримувати 20-40 абонентів. Результати досліджень моделі (3.27) із врахуванням (3.19) і (3.21), наведено на рис. 3.4.

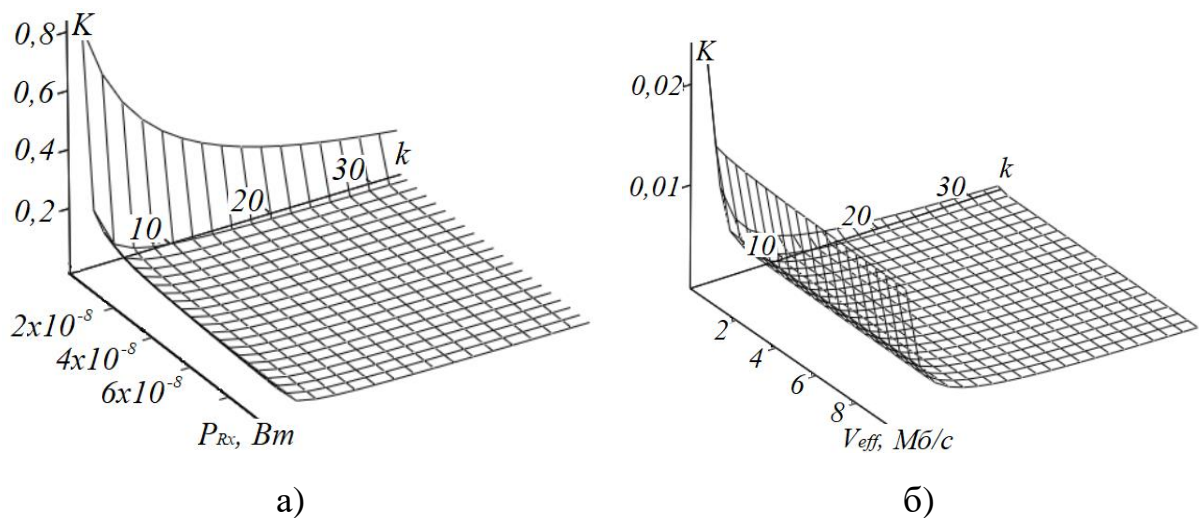


Рис. 3.4. Залежність ефективності радіоканалу від кількості активних абонентів від: а – потужності сигналу на вході приймача; б – ефективної швидкості передачі інформації

Аналіз результатів на рис. 3.4 показав, що рівень потужності сигналу на вході приймача має незначні зміни від кількості одночасно існуючих абонентів у мережі. Чим більше активних абонентів у мережі тим зменшується ефективність фізичного частотного каналу для окремо взятого абонента. При максимальній завантаженості частотного ресурсу, різниця ефективної швидкості передачі інформації становить більше ніж у два рази між одним та двома активними абонентами.

Отримані моделі призначені для теоретичного оцінювання ефективності передачі інформації по радіоканалах та прогнозування кількості корисної інформації при врахуванні різного роду технологій та кількості активних абонентів у мережі на основі специфікацій стандартів 5G і Wi-Fi.

3.2 Оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для одного активного радіоканалу у мережі

Побудова сучасних корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi передбачає використання багаторівневої структури. Це передбачає дослідження як окремих рівнів, так і мережі в цілому в реальних умовах, особливо в приміщеннях. Одним із важливих завдань є оцінювання та виявлення особливостей роботи мережі при існуванні декількох абонентів, їх взаємовплив, а також режим максимального завантаження радіоканалів при існуванні різного роду факторів впливу для розроблення ефективних рішень програмно-конфігурованих систем керування.

Запропонована математична модель радіоканалу в попередньому пункті, передбачає теоретичне оцінювання інформаційної та енергетичної ефективності радіоканалу та не враховує дію факторів впливу в реальних умовах. Врахування таких факторів можна досягти створенням інтегральних показників оцінювання ефективності радіоканалів на основі експериментальних досліджень та регресійного аналізу. Для цього використано аналогічну методику, як у розділі 2

на базі стандарту Wi-Fi, але для забезпечення багатоваріантності, використано інше обладнання та інші приміщення. Структура мережі наведена на рис 3.5.

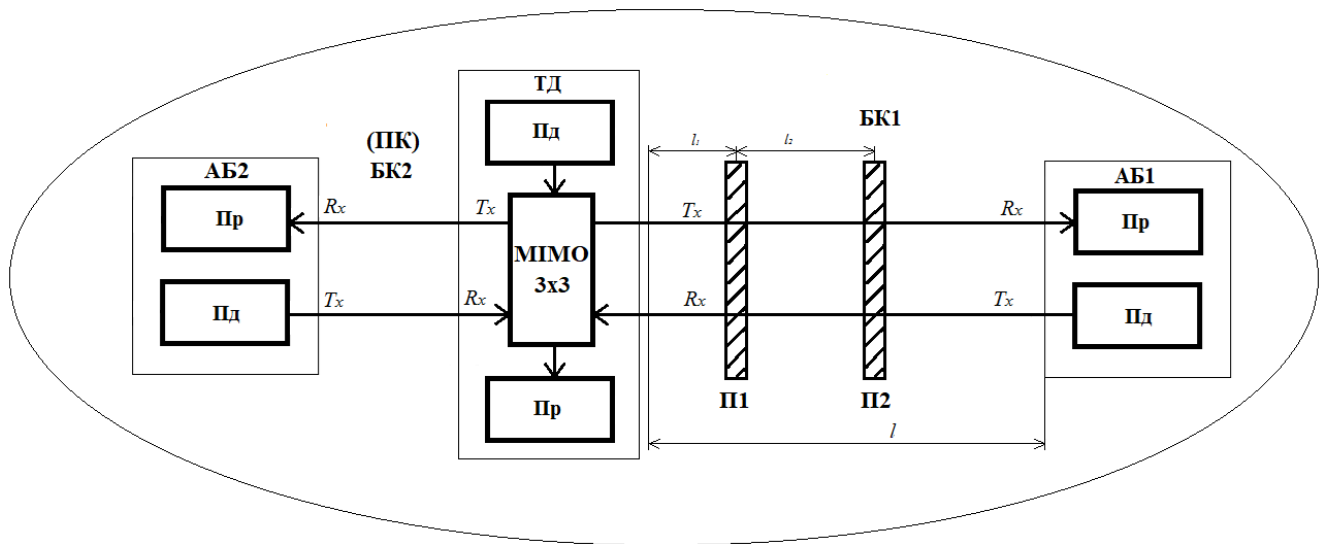
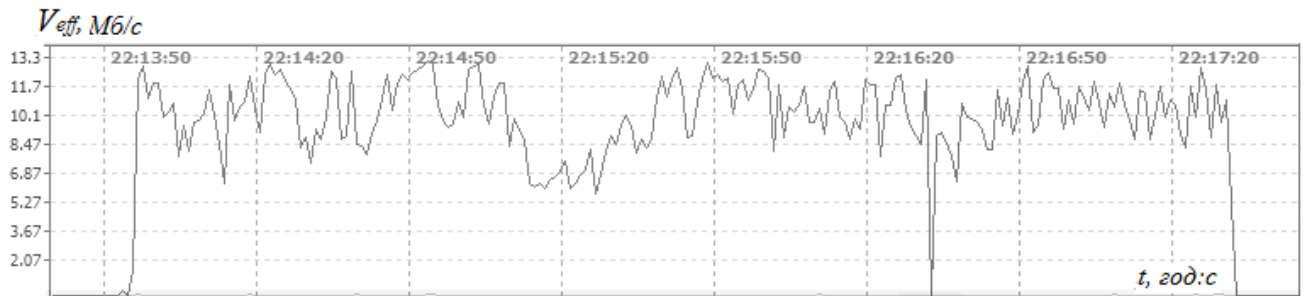


Рис. 3.5. Структура мережі для дослідження параметрів радіоканалу

Для досліджень обрано типове приміщення із можливістю створення радіоканалу довжиною до 15 м. Радіоканал складається із приймально-передавального обладнання на основі ТД та двох абонентських пристроїв (АП1, АП2), яке формує наступні структури: один радіоканал (БК1) та проводований канал (ПК) або два радіоканали (БК1) і (БК2). Для оцінювання впливу архітектурних перешкод було передбачено вносима перешкода П1 на відстані $l_1=3$ м та перешкода П2 на відстані $l_1+l_2=6$ м.

Мережа створена на основі ТД, яка підтримує всі стандарти Wi-Fi до 802.11ac для діапазону 5 ГГц. Такий діапазон було обрано на основі положень отриманих в другому розділі, як такий де можна мінімізувати вплив інтерференційних завад та шумів. В якості основного параметра для досліджень обрано ефективну швидкість передачі інформації V_{eff} , яка є основним показником критерію ефективності радіоканалу і який вказує на якість отримання інфокомунікаційних послуг на прикладному рівні. Даний параметр має пряму залежність від характеристики поширення сигналу у радіоканалі, тому іншим параметром було обрано потужність сигналу на вході приймача P_m та додатковим

параметром – пропускна здатність V_{pl} . Ці параметри визначаються за допомогою програмно-апаратних засобів моніторингу, а ефективна швидкість передачі інформації – за допомогою додатків прикладного рівня. Для прикладу, фрагменти моніторингу для ефективної швидкості передачі інформації, показано на рис. 3.6.



а)



б)

Рис. 3.6. Фрагмент моніторингу ефективної швидкості передачі для радіоканалу стандарту 802.11n із: а – шириною 20 МГц; б – шириною 40 МГц;

Як видно із графіків на рис 3.6, параметр ефективної швидкості передачі інформації також має флуктуації, як і потужність сигналу на вході приймача. Враховуючи нерівність (2.35), V_{eff} кінцевий результат враховує інтервал зміни флуктуацій та випадкову похибку оцінювання. Таким чином, отримаємо:

$$V_m - \Delta V - \sigma_V < V_{eff} \leq V_m + \Delta V + \sigma_V, \quad (3.28)$$

де ΔV – інтервал флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації; V_m – усереднене значення ефективної швидкості передачі інформації, або математичне очікування (вимірювальне значення); σ_V – випадкова похибка вимірювання.

Процес вимірювання V_m можна записати так:

$$V_m \approx \frac{1}{T} \int_0^T V_m(t) dt \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m,i}, \quad (3.29)$$

де $V_{m,i}$ – вимірювання ефективної швидкості передачі інформації за час одного циклу моніторингу; n – кількість циклів вимірювання протягом періоду спостереження T для отримання необхідної достовірності.

Довжина радіоканалу БК1 l є змінною, а довжина каналу БК2 є фіксованою та становить 2 м. В якості вносимих архітектурних перешкод обрано типові конструкції із дерева для імітації дверей, та цегли для стін. Дослідження проводились для наступних типових випадків, які зустрічаються у приміщеннях: пряма видимість; наявність одних дверей; наявність двох дверей; наявність однієї або двох стін.

Для оцінювання фактору впливу технології CSMA/CD, передбачено існування двох активних абонентських пристроїв із радіоканалами БК1 та БК2 – двох рухомих абонентів. Це передбачає дослідження впливу кількості абонентів у мережі та боротьби за ресурс частотного каналу.

Спершу розглянемо один активний радіоканал у мережі. Для цього було досліджено шість радіоканалів, максимальне значення параметру пропускної здатності фізичного рівня (V_{pl}) яких, наведено у табл. 3.1:

Пряма видимість. Пряма видимість є найбільш поширеною схемою побудови радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж у приміщеннях. Характеристики параметрів радіоканалів для прямої видимості наведено на рис. 3.7.

Параметри пропускної здатності фізичного рівня

	802.11a	802.11n 20 MHz	802.11n 40 MHz	802.11ac 20 MHz	802.11ac 40 MHz	802.11ac 80 MHz
$V_{pl\ max}$ MB/s	54	216,7	450	288,9	600	1300

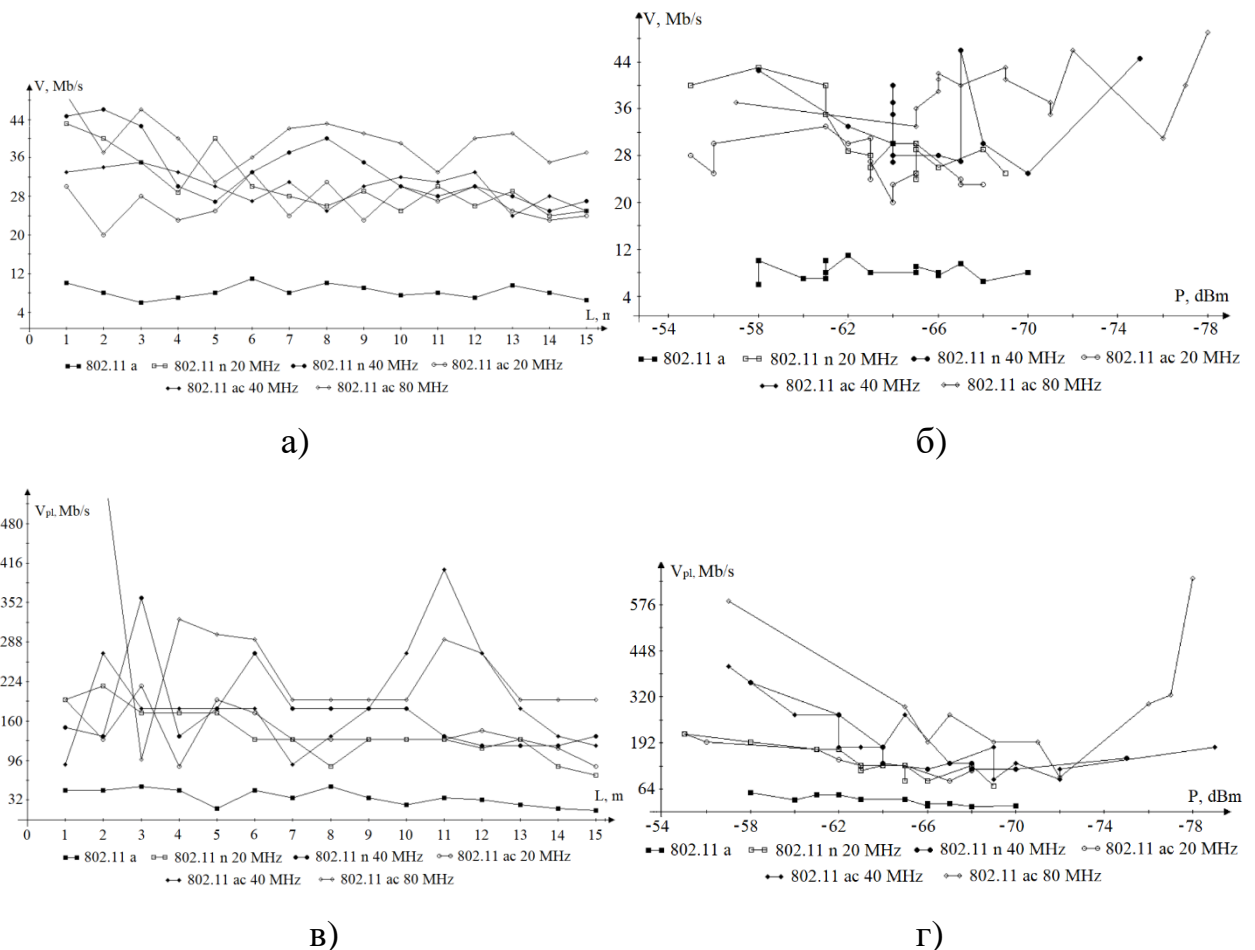


Рис. 3.7. Експериментальні залежності основних параметрів радіоканалу в межах прямої видимості: а – залежність ефективної швидкості передачі від довжини радіоканалу; б – залежність ефективної швидкості передачі від потужності сигналу на вході приймача; в – залежність пропускної здатності від довжини радіоканалу; г – залежність пропускної здатності від потужності сигналу на вході приймача

Залежності на рис. 3.7, показують існування флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації по всій довжині радіоканалу, які мають аналогічний характер, як і в параметра потужності сигналу на вході приймача. Можна припустити, що кожному інтервалу флуктуацій параметра P_m буде відповідати інтервал флуктуацій для параметра V_{eff} . Тоді, для кожного стандарту, що досліджується можна визначити інтервал флуктуацій ΔV , якому буде відповідати інтервал ΔP . Таким чином, для радіоканалів із прямою видимістю, можна отримати наступні результати, які наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Інтервали флуктуацій в межах прямої видимості

Параметр	802.11a	802.11n 20 МГц	802.11n 40 МГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
ΔP	± 5 дБм	± 5 дБм	± 6 дБм	± 5 дБм	± 7 дБм	± 6 дБм
ΔV	± 2 Мб/с	± 4 Мб/с	± 8 Мб/с	± 4 Мб/с	± 8 Мб/с	± 8 Мб/с

Як видно із табл. 3.2, підвищення пропускної здатності радіоканалу, за рахунок розширення спектра, приводить до збільшення рівня флуктуацій. Це є справедливим як для параметра рівня сигналу на вході приймача, так і для ефективної швидкості передачі інформації, для будь-якого стандарту. Аналогічне явище підтверджується характеристиками для параметра V_{pl} на рис. 3.7. в, де спостерігається досить значна динаміка зміни значень, що задаються схемою MCS.

Одна перешкода – дерево. Така схема імітує існування архітектурних перешкод у радіоканалі, таких як дерев'яні двері. Як показано у [82], для діапазону 2,4 ГГц, при існуванні одних дверей спостерігається ефект збільшення ефективної швидкості передачі інформації безпосередньо за ними. Тому, спочатку проаналізуємо результати експериментальних досліджень для умови однієї перешкоди в радіоканалі. Результати досліджень наведено на рис. 3.8.

Інтервали флуктуацій при існуванні однієї перешкоди із дерева наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Інтервали флуктуацій при існуванні однієї перешкоди

Параметр	802.11a	802.11n 20 МГц	802.11n 40 МГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
ΔP	± 7 дБм	± 6 дБм	± 10 дБм	± 9 дБм	± 15 дБм	± 15 дБм
ΔV	± 3 Мб/с	± 4 Мб/с	± 6 Мб/с	± 4 Мб/с	± 10 Мб/с	± 10 Мб/с

Аналіз отриманих результатів показує існування значних флуктуацій на характеристиках біля архітектурної перешкоди. В інших випадках можна вважати, що існування однієї перешкоди, як дерев'яні двері, у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, має мінімальний вплив, яким можна нехтувати. Незначне збільшення флуктуацій спостерігається для стандарту 802.11ac для широкосмугових частотних каналів, що можна пояснити збільшенням нестабільності радіоканалу.

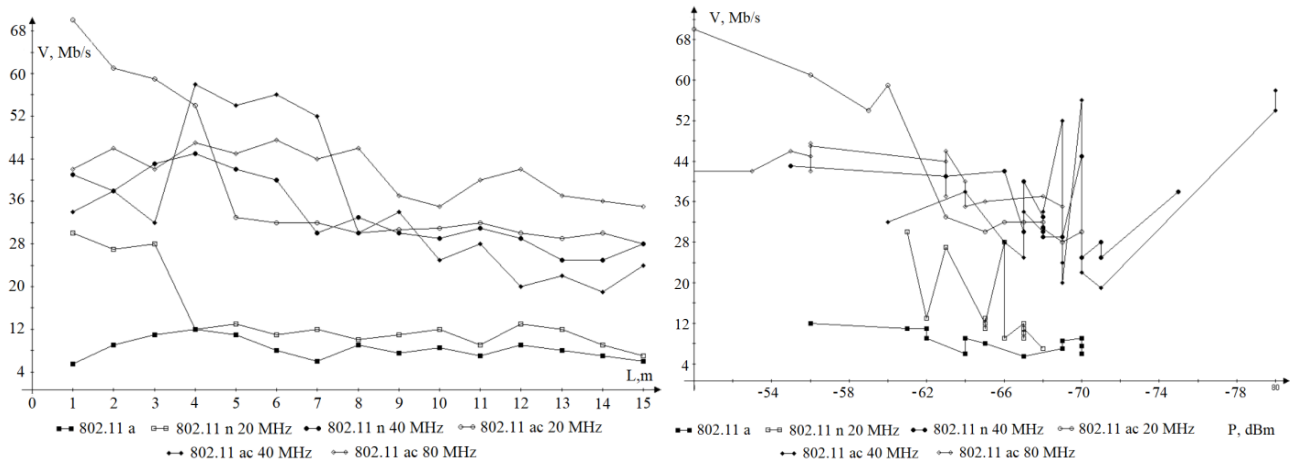
Дві перешкоди – дерево. Існування однієї перешкоди не має суттєвих змін на параметри радіоканалу, було досліджено вплив двох перешкод типу дерево. Така схема, також, є досить поширеною у більшості приміщень. Результати досліджень такого випадку, наведено на рис. 3.9.

Параметри флуктуацій основних параметрів каналів наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4

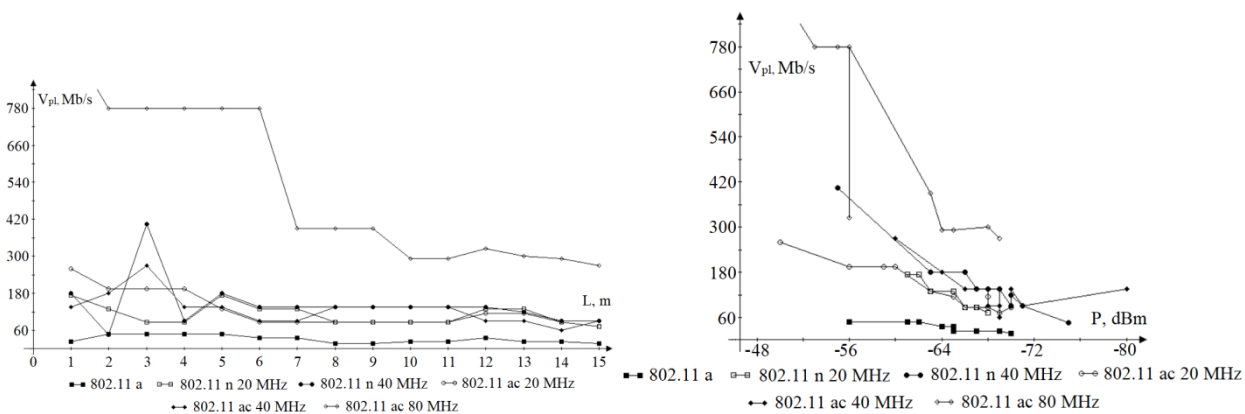
Інтервали флуктуацій при існуванні двох перешкод

Параметр	802.11a	802.11n 20 МГц	802.11n 40 МГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
ΔP	± 5 дБм	± 6 дБм	± 7 дБм	± 6 дБм	± 8 дБм	± 10 дБм
ΔV	± 4 Мб/с	± 6 Мб/с	± 7 Мб/с	± 6 Мб/с	± 7 Мб/с	± 7 Мб/с



а)

б)



в)

г)

Рис. 3.8. Експериментальні залежності основних параметрів радіоканалу при існуванні однієї перешкоди: а – залежність ефективної швидкості передачі від довжини радіоканалу; б – залежність ефективної швидкості передачі від потужності сигналу на вході приймача; в – залежність пропускної здатності від довжини радіоканалу; г – залежність пропускної здатності від потужності сигналу на вході приймача

Існування у радіоканалі другої перешкоди із дерева, приводить до послаблення рівня потужності сигналу на вході приймача в середньому на 5 дБм. Характеристика ефективної швидкості передачі інформації має більший коефіцієнт спадання після другої перешкоди.

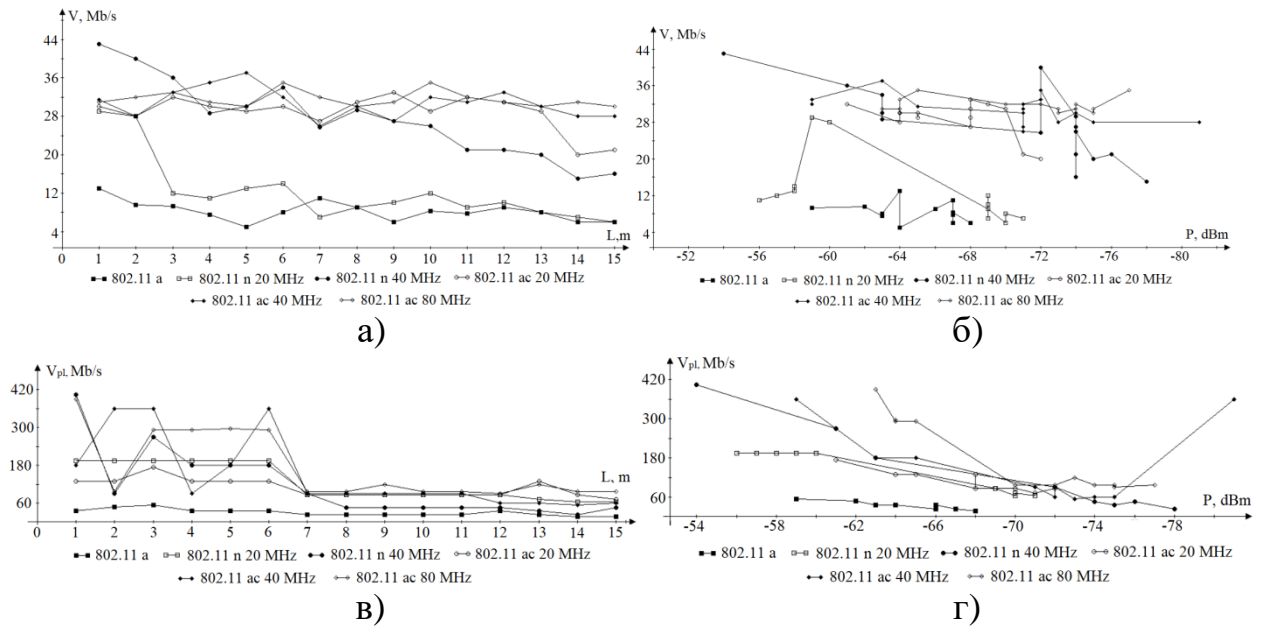
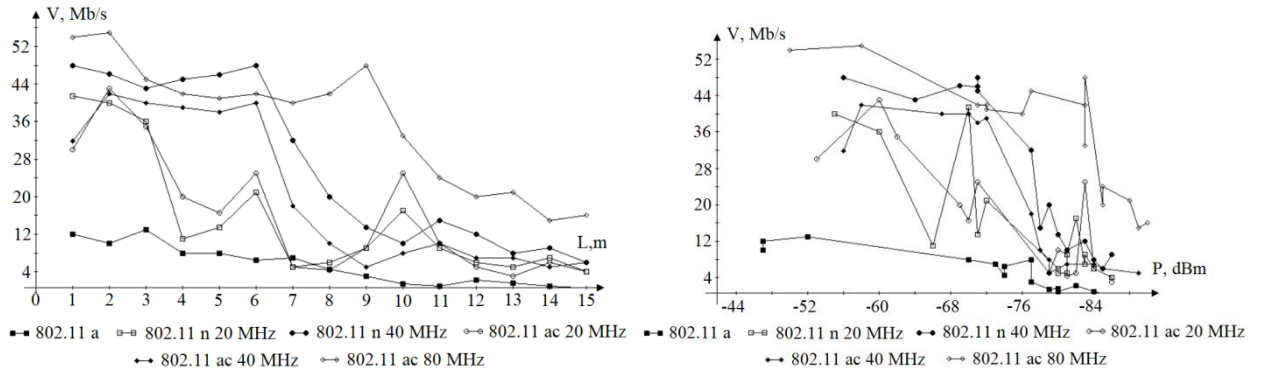


Рис. 3.9. Експериментальні залежності основних параметрів радіоканалу при існуванні двох перешкод: а – залежність ефективної швидкості передачі від довжини радіоканалу; б – залежність ефективної швидкості передачі від потужності сигналу на вході приймача; в – залежність пропускної здатності від довжини радіоканалу; г – залежність пропускної здатності від потужності сигналу на вході приймача

Друга перешкода зменшує рівень флуктуацій відносно попереднього випадку. На графіках рис. 3.9 в, видно, що існує певне граничне значення рівня потужності сигналу на вході приймача, нижче якого радіоканал із вищим порядком QAM модуляції переходить в режим роботи із меншим, із-за появи значної кількості помилок у кадрах.

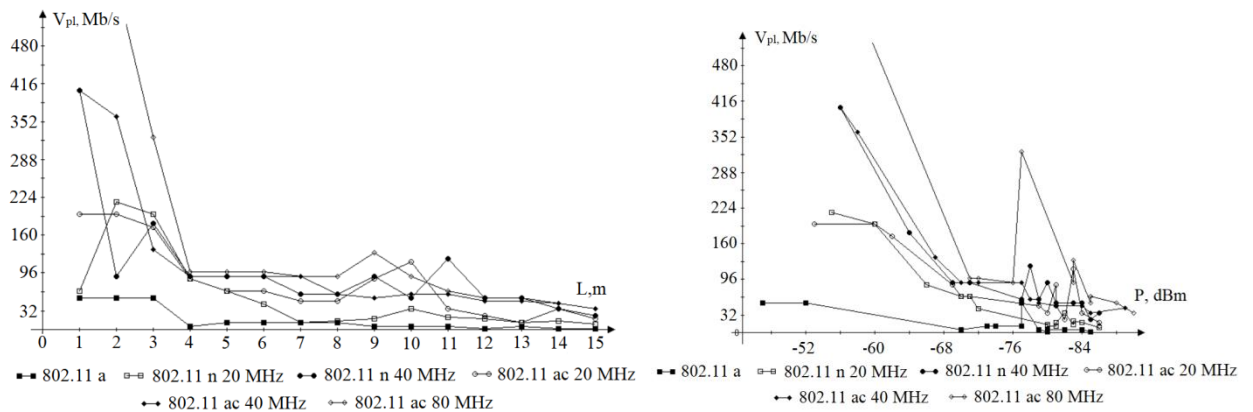
Перешкоди – стіни. Існування стін, як перешкод у радіоканалі, як правило, дає досить сильні затушення сигналу із-за більшого коефіцієнта поглинання сигналу. Результати досліджень наведено на рис. 3.10.

Результати флуктуацій основних параметрів сигналу наведено у табл. 3.5.



а)

б)



в)

г)

Рис. 3.10. Експериментальні залежності основних параметрів радіоканалу при існуванні двох стін: а – залежність ефективної швидкості передачі від довжини радіоканалу; б – залежність ефективної швидкості передачі від потужності сигналу на вході приймача; в – залежність пропускної здатності від довжини радіоканалу; г – залежність пропускної здатності від потужності сигналу на вході приймача

Таблиця 3.5

Інтервали флуктуацій при існуванні двох стін

Параметр	802.11a	802.11n 20 МГц	802.11n 40 МГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
ΔP	± 15 дБм	± 15 дБм	± 17 дБм	± 16 дБм	± 17 дБм	± 20 дБм
ΔV	± 3 Мб/с	± 4 Мб/с	± 6 Мб/с	± 4 Мб/с	± 10 Мб/с	± 10 Мб/с

Аналіз отриманих результатів показав, що при існуванні двох стін, спостерігається аналогічне обмеження пропускної здатності радіоканалу на фізичному рівні, що підтверджує припущення про граничне значення параметра потужності сигналу, при якому радіоканал переходить в більш низькошвидкісний режим. Одним із методів покращення характеристик ефективної швидкості передачі за перешкодою є застосування широкосмугових частотних каналів. При існуванні другої перешкоди у радіоканалі крутість спадання характеристик зростає.

Підводячи підсумок, можна стверджувати, що існування архітектурних перешкод різних типів у радіоканалі, має однаковий характер впливу, що залежить від товщини та густини матеріалу, який використовується. Це є справедливим, якщо рівень потужності сигналу не опускається нижче певного порогового значення. Існування архітектурних перешкод є вагомим фактором впливу, і його можна враховувати як адитивний коефіцієнт затухання.

Для отриманих результатів експериментальних досліджень запропоновано інтегральний показник ефективності одного активного радіоканалу для кожного розглянутого випадку, використовуючи вираз (3.1). Для цього, на основі методів математичної регресії та статистичного аналізу, отримано загальні математичні моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації та пропускної здатності радіоканалу, які можна записати так:

$$V_{\text{eff}}(l) \approx -u \cdot l + s, \quad (3.30)$$

$$V_{\text{pl}}(l) \approx -hl + x, \quad (3.31)$$

де u , h – коефіцієнти спадання характеристик; s і x – початкові коефіцієнти ефективної швидкості передачі та пропускної здатності радіоканалу, відповідно; l – довжина радіоканалу.

Враховуючи концепцію побудови мультисервісних мереж та механізму контролю якості інфокомунікаційних послуг [270], параметр ефективної

швидкості передачі інформації повинен характеризуватись мінімальним значенням флуктуацій у інтервалі ΔP . Підставляючи (3.30) у (3.1) отримаємо модель оцінювання інформаційної ефективності, яку можна записати так:

$$K_{eff}^e \approx \frac{s - u \cdot l - \Delta V}{V_{pl.\max}}, \quad (3.32)$$

Коефіцієнт зміни пропускної здатності від довжини радіоканалу можна визначити як:

$$K_{pl} \approx \frac{x - hl}{V_{pl.\max}}. \quad (3.33)$$

Флуктуації пропускної здатності можна не враховувати, оскільки їх вплив існує тільки при максимальному навантаженні на радіоканал або при великих значеннях l . Використовуючи метод усереднення до результатів регресійного аналізу отриманих експериментальних даних, визначимо коефіцієнтів складових виразів (3.32) і (3.33). Результати наведено у таблиці 3.6.

Аналіз отриманих результатів у табл. 3.6 показує, що по аналогії до розділу 2, коефіцієнти спадання можна привести до усередненого значення для всіх стандартів, а відмінність визначати за допомогою інтервалу відхилень та початкових коефіцієнтів s і x . Введемо поняття межі допустимих змін для коефіцієнтів спадання для характеристик ефективною швидкості передачі інформації та пропускної здатності радіоканалу.

Тоді отримаємо наступні вирази:

$$u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \pm \Delta u, \quad h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \pm \Delta h, \quad (3.34)$$

Значення коефіцієнтів спадання u і h

	802.11a	802.11n 20 MHz	802.11n 40 MHz	802.11ac 20 MHz	802.11ac 40 MHz	802.11ac 80 MHz
	Пряма видимість					
u	0,04	0,9	1,1	0,04	0,5	0,4
h	2,2	7	6	4,7	2,5	9
	Одні двері					
u	0,16	0,8	1,3	1,1	1,5	1,6
h	1,6	3,45	6,2	6	7	15
	Двоє дверей					
u	0,24	0,7	1,5	0,6	0,3	0,4
h	1,84	5,7	10	4,5	8,2	12
	Стіни					
u	0,7	1,3	2,6	1,8	2,1	2,76
h	2,1	5,5	6,8	5,2	7,6	9,2

де Δu , Δh – коефіцієнти які визначають межі допустимих змін коефіцієнтів спадання; n – кількість отриманих залежностей для усереднення.

Виконуючи розрахунки усереднення на основі значень коефіцієнтів табл. 3.10, отримаємо:

$$u = 1,3 \pm 1,4 \text{ (Мб / м)}, \quad h = 8 \pm 6,5 \text{ (Мб / м)}. \quad (3.35)$$

Підставляючи (3.35) у (3.32) і (3.33), та враховуючи можливість існування сукупності архітектурних перешкод різного роду у приміщенні, інтегральні показники інформаційної ефективності для одного активного радіоканалу у корпоративній телекомунікаційній мережі, можна записати так:

$$K \approx \frac{1}{V_{pl.\max}} \sum_{i=1}^k \lambda_i (s_i - (u_i \pm \Delta u_i) \cdot l - \Delta V_i), \quad (3.36)$$

$$K_{pl} \approx \frac{1}{V_{pl.\max}} \sum_{i=1}^k \lambda_i^{pl} x_i - (h_i \pm \Delta h_i) \cdot l. \quad (3.37)$$

де k – кількість перешкод у радіоканалі; λ_i і λ_i^{pl} – вагові коефіцієнти перешкоди.

Приклад оцінювання на основі отриманих інтегральних показників, для радіоканалу стандарту 802.11n із смугою 20 МГц наведено на рис. 3.11.

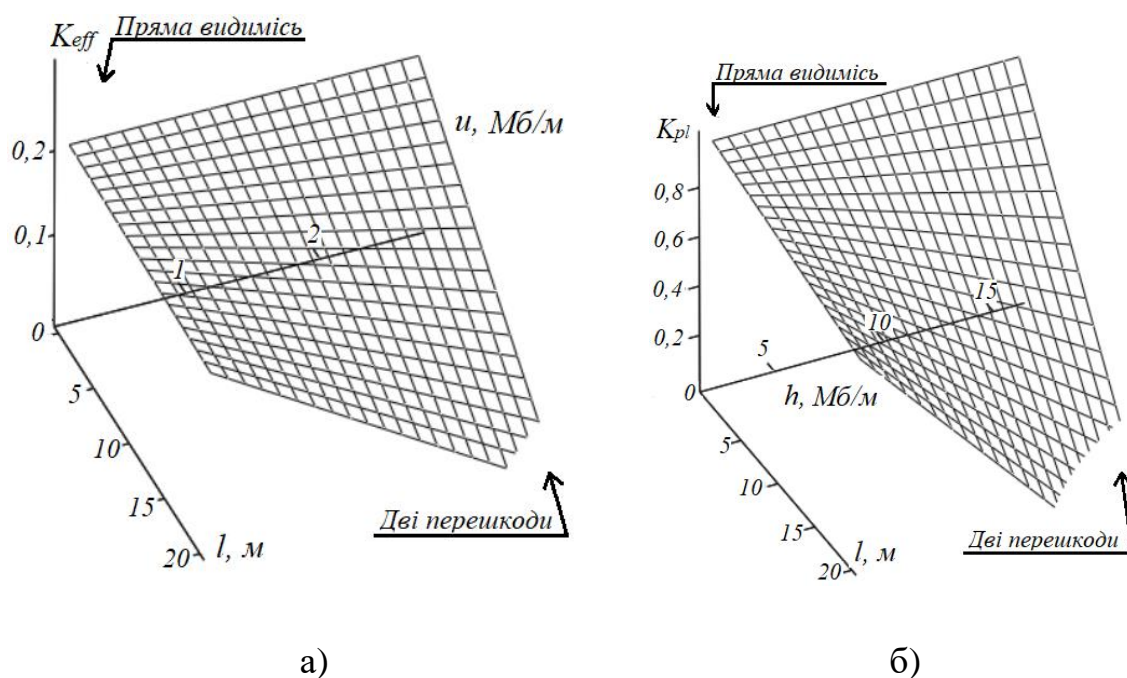


Рис. 3.11. Залежність: а – інтегрального показника ефективності радіоканалу від Δu ; б – інтегрального показника пропускної здатності від Δh

Аналіз отриманих результатів на рис. 3.11, показує пряму залежність інтегральних показників від кількості архітектурних перешкод та густини матеріалу для одного активного радіоканалу у мережі. Далі розглянемо існування двох активних радіоканалів.

3.3 Оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для двох активних радіоканалів у мережі

Аналогічно було проведено експериментальні дослідження для випадку існування двох активних абонентів (два активні радіоканали) у корпоративній телекомунікаційній мережі. Це передбачає максимальне завантаження радіоканалів ($\gamma_i=1$ у виразі 3.27), де використовується максимально можлива боротьба за фізичний ресурс частотного каналу.

Пряма видимість. Результати експериментальних досліджень із використанням схеми АБ2-БК2-ТД-БК1-АБ1 на рис. 3.5, наведено на рис. 3.12.

Як видно із графіків на рис. 3.12, характеристики ефективної швидкості передачі інформації мають характер згасання і мають схожий характер для різних стандартів. Як і у випадку із одним активним каналом, найбільш стабільна характеристику має канал стандарту 802.11a. Найбільш нестабільну – канал стандарту 802.11ac, за рахунок зменшеної кількості захисних інтервалів при формуванні OFDM сигналу. Крім того, підвищення нестабільності пов'язане із використанням більшої ширини каналу, оскільки два абоненти використовують один і той же частотний ресурс.

Рівні флуктуацій основних параметрів радіоканалу для двох активних абонентів наведено у тал. 3.7.

Таблиця 3.7

Інтервали флуктуацій в межах прямої видимості

Параметр	802.11a	802.11n 20 МГц	802.11n 40 МГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
ΔP	± 6 дБм	± 8 дБм	± 5 дБм	± 7 дБм	± 8 дБм	± 8 дБм
ΔV	± 2 Мб/с	± 4 Мб/с	± 2 Мб/с	± 4 Мб/с	± 6 Мб/с	± 8 Мб/с

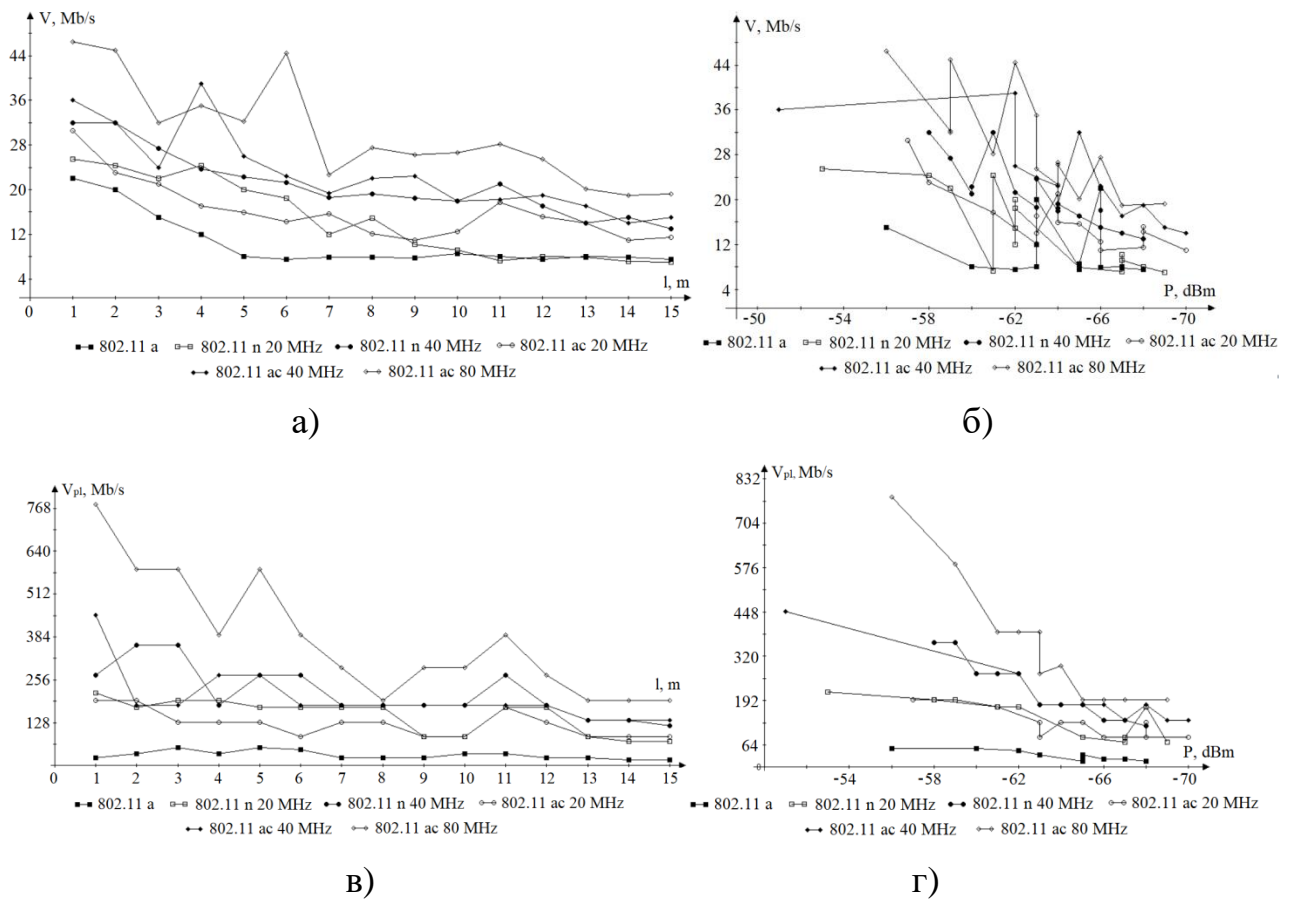


Рис. 3.12. Експериментальні залежності основних параметрів радіоканалу в межах прямої видимості для двох активних абонентів: а – залежність ефективної швидкості передачі від довжини радіоканалу; б – залежність ефективної швидкості передачі від потужності сигналу на вході приймача; в – залежність пропускної здатності від довжини радіоканалу; г – залежність пропускної здатності від потужності сигналу на вході приймача

Результати пропускної здатності радіоканалів показують, що при існуванні двох активних абонентів у мережі виникають значні обмеження для високопродуктивних режимів, особливо для стандарту 802.11ac. Ці обмеження встановлюються високими вимогами параметра сигнал/шум для високих порядків QAM модуляції. В реальних умовах, при існуванні різного роду факторів впливу в середовищі передачі, одними з яких є інтерференційні завади, забезпечення високопродуктивного режиму є можливим тільки в безпосередній близькості абонента до ТД. Як виключення, може бути ситуація знаходження абонентського

пристрою в зоні максимуму просторового розподілу сигналу, що може підвищити рівень сигнал/шум та збільшити пропускну здатність у радіоканалі.

Одна перешкода – дерево. Результати досліджень наведено на рис. 3.13.

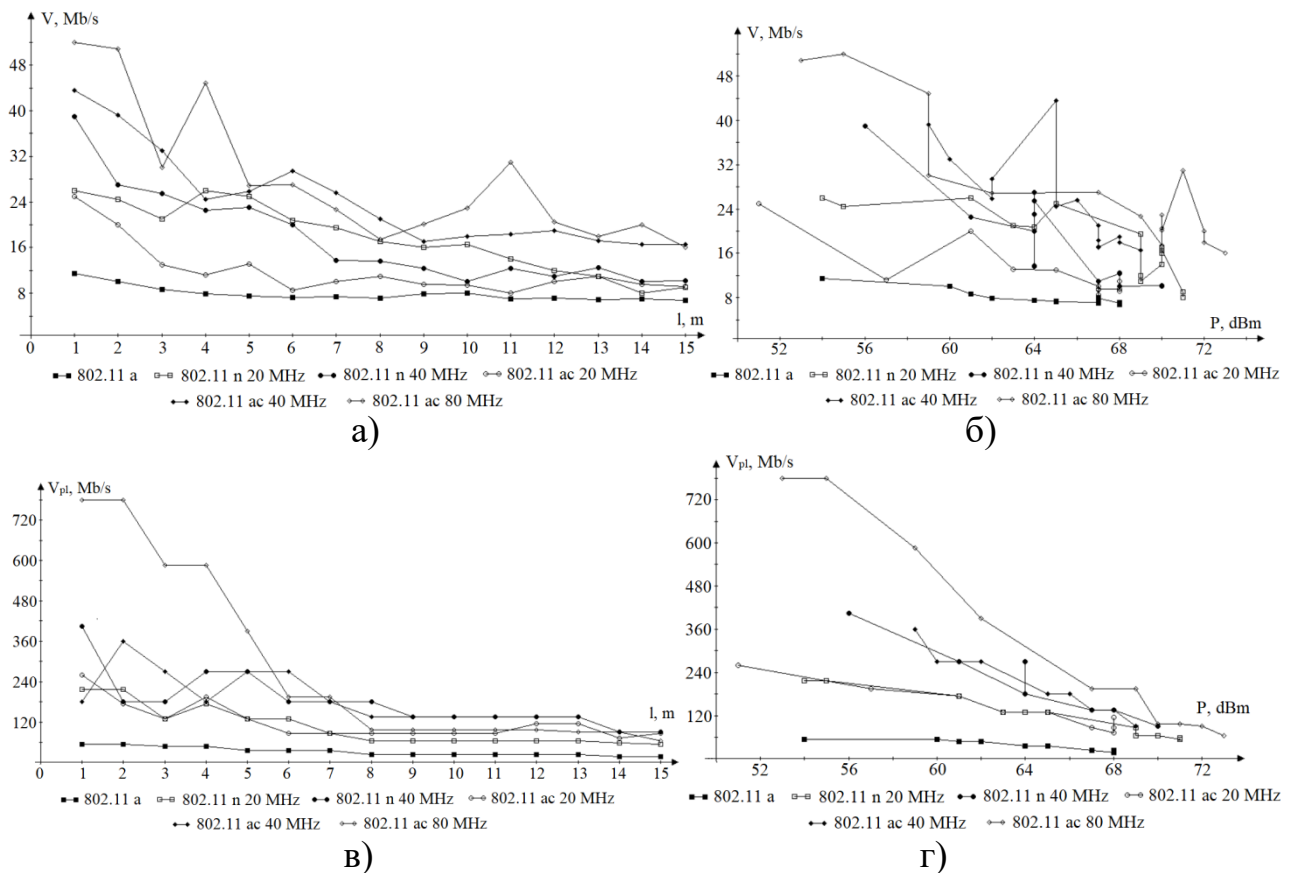


Рис. 3.13. Експериментальні залежності основних параметрів радіоканалу при існуванні однієї перешкоди для двох активних абонентів: а – залежність ефективної швидкості передачі від довжини радіоканалу; б – залежність ефективної швидкості передачі від потужності сигналу на вході приймача; в – залежність пропускну здатності від довжини радіоканалу; г – залежність пропускну здатності від потужності сигналу на вході приймача

Рівень флуктуацій наведено на у табл. 3.8.

Отримані характеристики мають аналогічний характер, але із більшим рівнем флуктуацій. Найбільші флуктуації спостерігаються для широкосмугового радіоканалу 802.11ac 80 МГц. Параметри флуктуацій табл. 3.8 є справедливими для результатів за 3 м до, та 3 м після внесеної перешкоди.

Таблиця 3.8

Інтервали флуктуацій при існуванні однієї перешкоди

Параметр	802.11a	802.11n 20 МГц	802.11n 40 МГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
ΔP	± 6 дБм	± 7 дБм	± 6 дБм	± 8 дБм	± 6 дБм	± 10 дБм
ΔV	± 2 Мб/с	± 4 Мб/с	± 5 Мб/с	± 3 Мб/с	± 5 Мб/с	± 10 Мб/с

В іншому випадку, флуктуації є меншими в 1,5..2 рази, в залежності від стандарту радіоканалу, і відповідають прямій видимості. З точки зору фізичного рівня, існування однієї перешкоди приводить до виникнення значних помилок у кадрах при передачі. При цьому, малі захисні інтервали стандарту 802.11ac є негативним фактором, що підвищує його нестабільність. В результаті встановлено, що найбільш ефективним і стабільним є радіоканал 802.11n зі смугою 40 МГц.

Дві перешкоди – дерево. Результати експериментальних досліджень, наведено на рис. 3.14.

Рівень флуктуацій основних параметрів наведено у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Інтервали флуктуацій при існуванні двох перешкод

Параметр	802.11a	802.11n 20 МГц	802.11n 40 МГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
ΔP	± 10 дБм	± 11 дБм	± 12 дБм	± 10 дБм	± 12 дБм	± 14 дБм
ΔV	± 2 Мб/с	± 5 Мб/с	± 6 Мб/с	± 5 Мб/с	± 6 Мб/с	± 7 Мб/с

Як і у випадку однієї перешкоди, результати табл. 3.9 є справедливими за 3 м до першої перешкоди, та за 3 м після другої перешкоди. На такому відрізку спостерігається досить сильна нестабільність отриманих залежностей. Можна припустити, що ефект багатопроменевого поширення хвиль підсилюється при

існуванні близько розташованих відбиваючих поверхонь, за рахунок повторного відбиття від сусідньої поверхні перешкоди. Далі рівень флуктуацій є аналогічним як і у випадку із однією перешкодою.

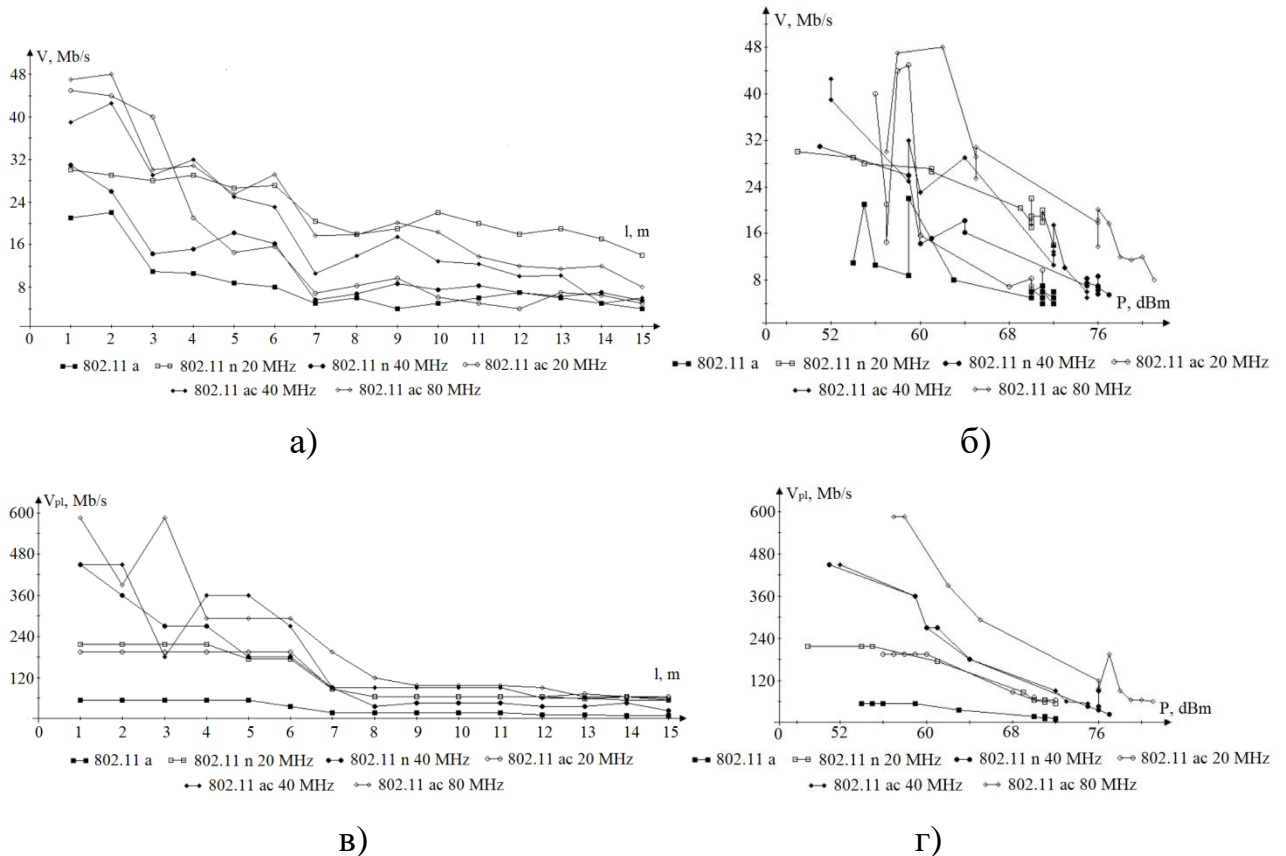


Рис. 3.14. Експериментальні залежності основних параметрів радіоканалу при існуванні двох перешкод для двох активних абонентів: а – залежність ефективної швидкості передачі від довжини радіоканалу; б – залежність ефективної швидкості передачі від потужності сигналу на вході приймача; в – залежність пропускної здатності від довжини радіоканалу; г – залежність пропускної здатності від потужності сигналу на вході приймача

З точки зору фізичного рівня, пропускна здатність радіоканалів після перешкод є обмеженою на рівні стандарту 802.11n та залежить від смуги частотного каналу. Значні затухання унеможливають використання високопродуктивних режимів стандарту 802.11ac.

Перешкоди – стіни. Результати експериментальних досліджень наведено на рис. 3.15.

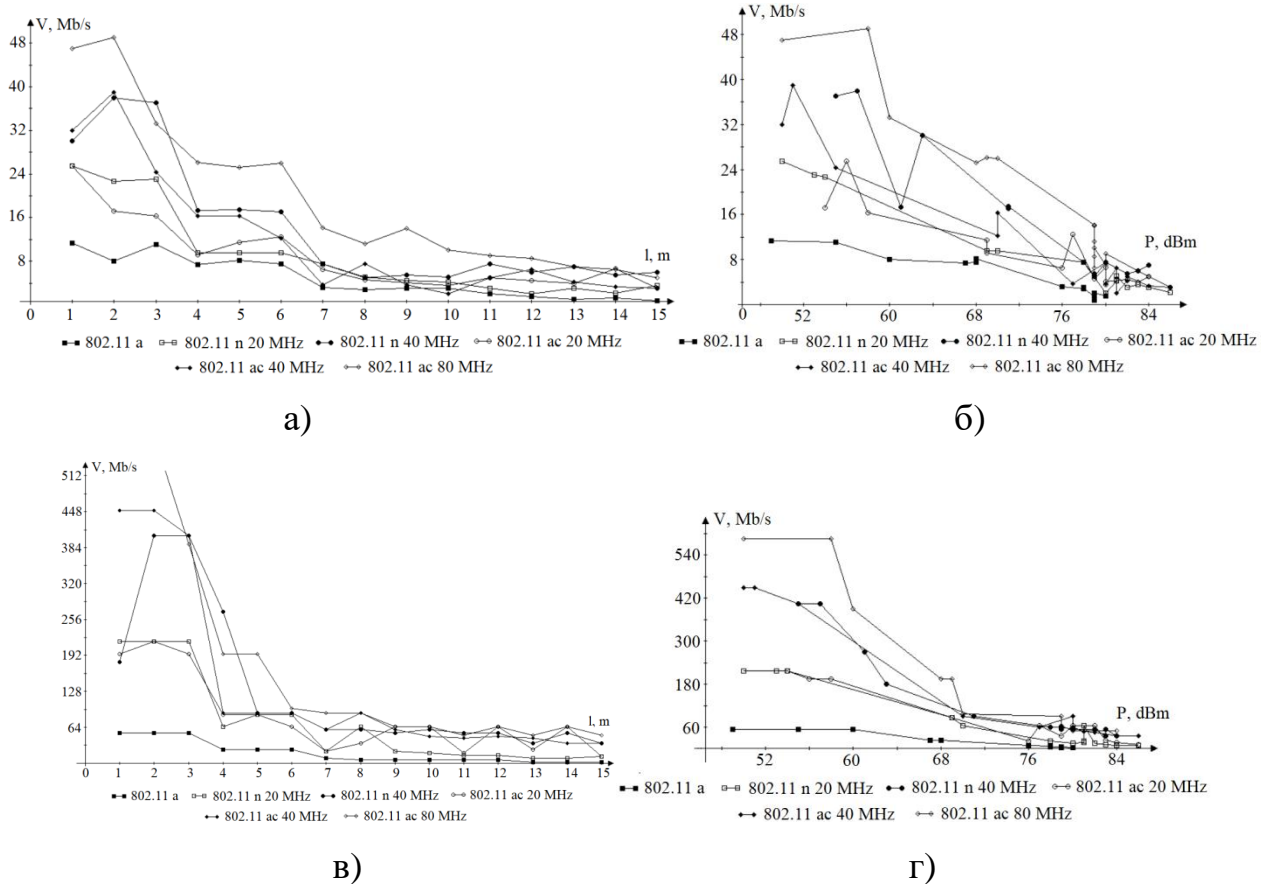


Рис. 3.15. Експериментальні залежності основних параметрів радіоканалу при існуванні двох стін для двох активних абонентів: а – залежність ефективної швидкості передачі від довжини радіоканалу; б – залежність ефективної швидкості передачі від потужності сигналу на вході приймача; в – залежність пропускної здатності від довжини радіоканалу; г – залежність пропускної здатності від потужності сигналу на вході приймача

Як видно із графіків на рис. 3.15, при двох активних радіоканалах, спостерігається досить значне зменшення ефективної швидкості передачі інформації. На відміну від одного активного радіоканалу, тут існують стрибкоподібні спадаючі ділянки на характеристиках. При цьому коефіцієнт спадання має пряму залежність від густини архітектурної перешкоди.

Рівень флуктуацій основних параметрів наведено у таблиці 3.10.

Інтервали флуктуацій при існуванні двох стін

Параметр	802.11a	802.11n 20 МГц	802.11n 40 МГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
ΔP	± 14 дБм	± 16 дБм	± 16 дБм	± 13 дБм	± 18 дБм	± 20 дБм
ΔV	± 3 Мб/с	± 5 Мб/с	± 10 Мб/с	± 4 Мб/с	± 12 Мб/с	± 14 Мб/с

При існуванні у радіоканалі архітектурних перешкод із високою густиною, флуктуації сигналу досягають значних відхилень, які можуть досягати до $\pm 13..20$ дБм. Це дозволяє зробити припущення, що густина матеріалу також має прямий вплив на коефіцієнт багатопроменевого поширення хвиль. Існування двох архітектурних перешкод значно послаблює рівень сигналу, але працездатність радіоканалу може зберігатись із низькою пропускнуою здатністю, за рахунок перемикання його у менш швидкісний режим.

Аналогічно до випадку одного активного радіоканалу, застосуємо метод математичної регресії для аналізу експериментальних досліджень. Характер отриманих залежностей має схожість із результатами при існуванні інтерференційних завад. Тому, активні радіоканали у мережі можна вважати як певний тип інтерференційних завад [109, 112, 143, 145]. Найбільш оптимальними будуть квадратична та логарифмічна моделі, кожна з яких має відповідні обмеження:

$$V_{eff}(l) \approx -f \cdot \ln(l) + x; \quad \text{при } l > 4m; \quad (3.38)$$

або

$$V_{eff}(l) \approx ul^2 - lz + v; \quad \text{при } l < 15m; \quad (3.39)$$

де f , u , z – коефіцієнти спадання регресії; x і v – початкові коефіцієнти ефективної швидкості передачі інформації.

Значення коефіцієнтів спадання наведено у таблиці 3.11.

Коефіцієнти спадання для моделей (3.38) і (3.39)

	802.11a	802.11n 20 MHz	802.11n 40 MHz	802.11ac 20 MHz	802.11ac 40 MHz	802.11ac 80 MHz
Пряма видимість						
<i>f</i>	5,6	8,47	7,17	6,1	8,14	10
<i>u</i>	0,16	0,1	0,1	0,14	0,1	0,1
<i>z</i>	3,36	2,67	2,5	3,2	2,5	2,8
Одні двері						
<i>f</i>	1,5	6,8	10,5	5,2	10,5	13
<i>u</i>	0,04	0,04	0,2	0,15	0,17	0,25
<i>z</i>	0,78	0,77	4,7	3,1	4,5	6,2
Двоє дверей						
<i>f</i>	6,6	5,9	9,35	17,7	14	15,2
<i>u</i>	0,17	0,27	0,18	0,4	0,17	0,2
<i>z</i>	3,6	1,48	4,4	9,2	5,1	5,6
Стіни						
<i>f</i>	4,4	9,8	13	7,8	13,7	18
<i>u</i>	0,04	0,2	0,3	0,17	0,3	0,27
<i>z</i>	1,5	4,7	6,74	4	7	7,4

На основі виразів (3.35), отримаємо:

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \pm \Delta f, \quad u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \pm \Delta u, \quad z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \pm \Delta z, \quad (3.40)$$

де Δf , Δu , Δz – коефіцієнти, які визначають межі допустимих змін коефіцієнтів спадання.

Використовуючи результати у табл. 3.11 та вирази (3.40), отримаємо:

$$\begin{aligned}
f &= 11 \pm 6 \text{ (Мб / м)}, \\
u &= 0,2 \pm 0,15 \text{ (Мб / м)}, \\
z &= 4,8 \pm 4 \text{ (Мб / м)}.
\end{aligned}
\tag{3.41}$$

Моделі (3.38) і (3.39) мають обмеження за параметром l . На основі отриманих коефіцієнтів спадання та математичних досліджень було встановлено, що обмеження за l можна вирішити за допомогою методу усереднення середнім гармонійним. Також, встановлено що: $v \approx x+3$ (Мб/с). Тоді, враховуючи сукупність архітектурних перешкод у приміщенні, інтегральний показник інформаційної ефективності для двох активних радіоканалів у корпоративній телекомунікаційній мережі, можна записати як середнє гармонійне для виразів (3.38) та (3.39). В результаті отримаємо:

$$K_{eff}^e \approx \frac{1}{V_{pl,max}} \sum_{i=1}^k \lambda_i \left(\frac{2(x_i - (f_i \pm \Delta f_i) \ln(l)) \cdot ((u_i \pm \Delta u_i) l^2 - (z_i \pm \Delta z_i) l + x_i + 3)}{(u_i \pm \Delta u_i) l^2 - (f_i \pm \Delta f_i) \ln(l) - (z_i \pm \Delta z_i) l + x_i + 3} - \Delta V_i \right), \tag{3.42}$$

де k – кількість перешкод; λ_i – вагові коефіцієнти перешкоди.

Інтегральний показник ефективності радіоканалу при існуванні двох активних абонентів у мережі залежить від коефіцієнтів спадання та їх інтервалів відхилень. За допомогою цих інтервалів можна визначати тип архітектурних перешкод. Це можна підтвердити за допомогою математичного дослідження виразу (3.42), результати якого наведено на рис. 3.16.

Інтервал Δx показує залежність інтегрального показника ефективності радіоканалу від режиму роботи. Для оцінювання впливу архітектурних перешкод використовується інтервали Δf , Δu і Δz , на основі яких, можна встановити як змінюється ефективність радіоканалу в залежності від кількості перешкод та їх густини.

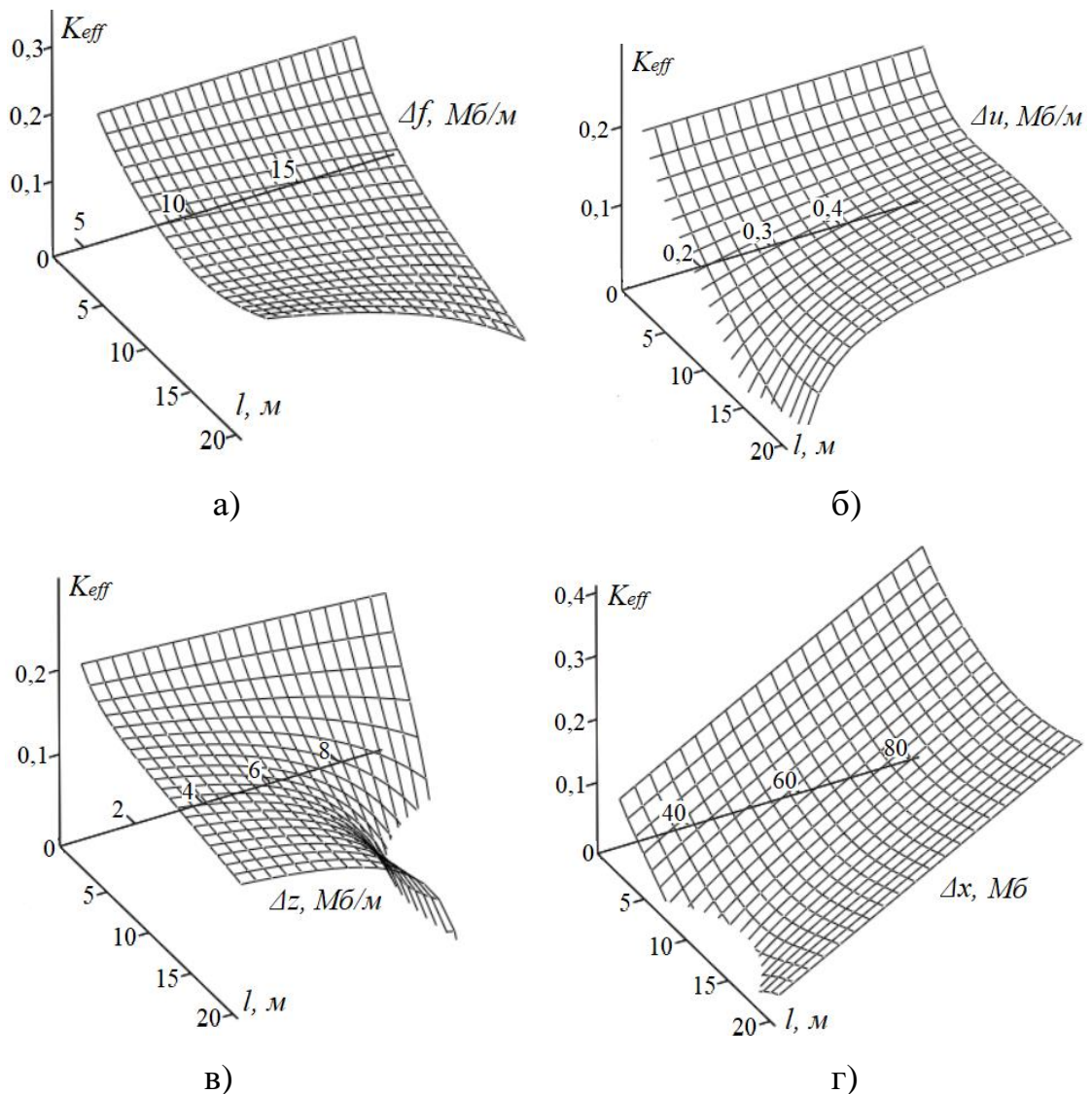


Рис. 3.16. Залежність коефіцієнта ефективності радіоканалу від: а – Δf ;
 б – Δu ; в – Δz ; г – Δx

Інтегральні показники ефективності радіоканалів (3.36) і (3.42) призначені для оцінювання та прогнозування інформаційних втрат в умовах існування різного роду архітектурних перешкод по всій довжині покриття мережі, а також оцінювання двох радіоканалів при максимальному навантаженні, та є справедливими для стандартів Wi-Fi і 5G. Рівень адекватності 0,8..0,9. До недоліків можна віднести: кількість активних радіоканалів, не враховуються інші фактори впливу, для врахування флуктуацій необхідно створення значної бази експериментальних досліджень коефіцієнтів відхилення.

3.4 Розроблення методу визначення ефективної швидкості передачі інформації в радіоканалі

Запропонована математична модель радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж (3.27) містить параметри, що розраховуються на основі специфікацій відповідних стандартів 5G/Wi-Fi.. Результат оцінювання за такою моделлю має характер математичного очікування. Моделі (3.36) і (3.42) враховують флуктуації та дію факторів впливу в комплексі, але попередньо потребують великої кількості статистичних досліджень. Тому, тут виникає компромісне рішення: або низька достовірність для реальних умов, або висока складність реалізації та врахування флуктуацій. Для вирішення цього, запропоновано використовувати статистичні параметри програмно-апаратних засобів моніторингу приймальних пристроїв на основі нового методу із простою та доступною реалізацією та високою достовірністю із врахуванням максимально-можливої кількості факторів впливу.

В попередніх розділах встановлено, що використання програмно-апаратних засобів моніторингу передбачає застосування статистичних моделей обробки та методів усереднення результатів досліджень. Моніторинг дає можливість отримати інформацію про: кількість переданих N^{Tx}_{MSDU} та прийнятих кадрів N^{Rx}_{MSDU} за одиницю часу; кількість перезапиту на повторну передачу кадру N_r ; кількість вдало переданих кадрів, для яких було виконано більше ніж один повторний запит $N_{m,r}$, кількість втрачених кадрів N_f . Оцінювання таких параметрів можна виконувати на основі запропонованої структурної схеми, як показано на рис. 3.17.

Оскільки, існує статистика кількості отриманих та переданих кадрів MSDU. то службову інформацію, яку додає каналний та фізичний рівень, під час циклів передачі кадрів у радіоканалах, можна не враховувати.

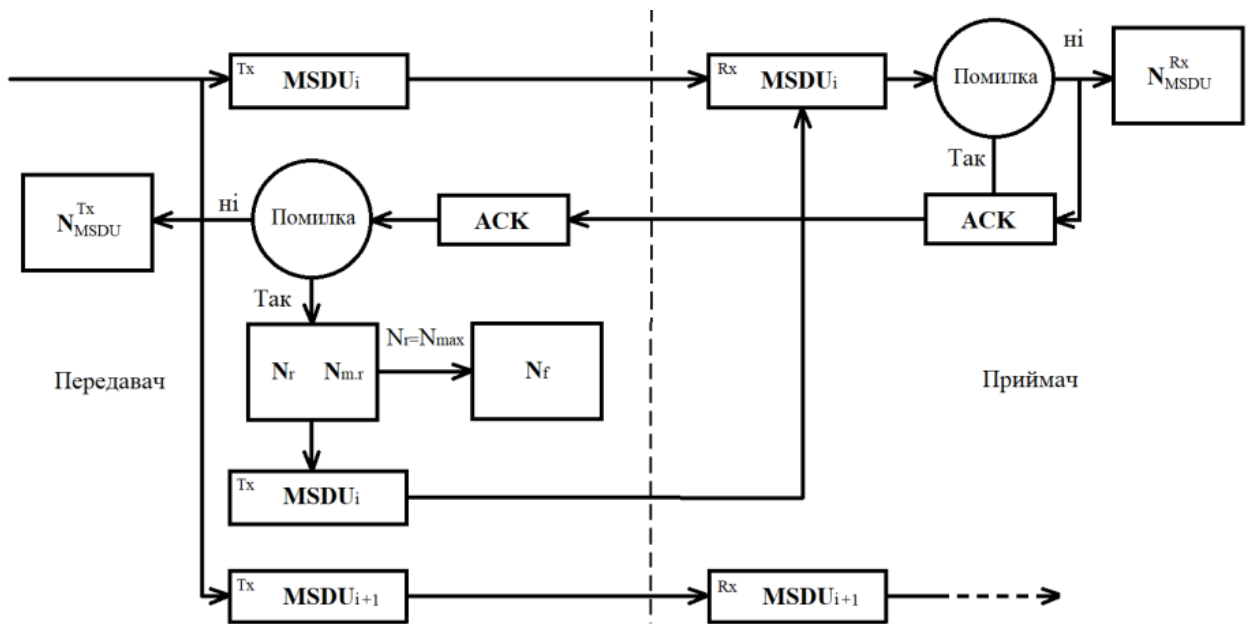


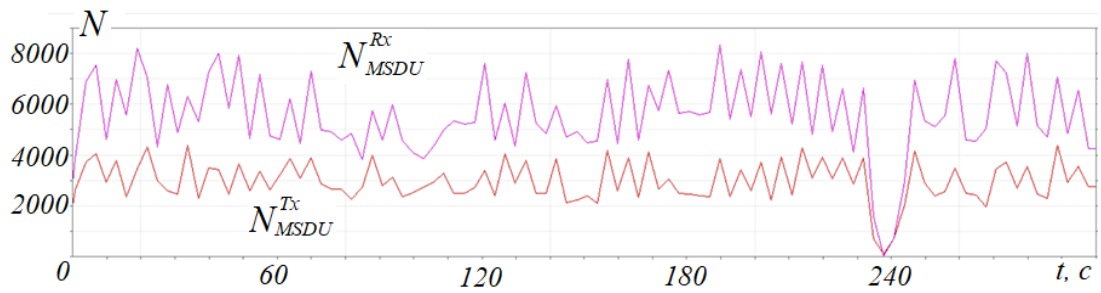
Рис. 3.17. Структурна схема оцінювання параметрів корисної інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж при передачі кадрів

Підтвердження вдалої передачі виконується за допомогою кадру ACK. При появі помилки, кадр ACK не надсилається і передавач створює цикл повторної передачі кадру MSDU, що фіксується параметрами N_r , і $N_{m,r}$. Це створює додаткові затримки в радіоканалі для передачі наступних кадрів. При перевищенні максимально-можливої кількості циклів повторної передачі N_{max} , кадр є втраченим, що фіксується параметром N_f .

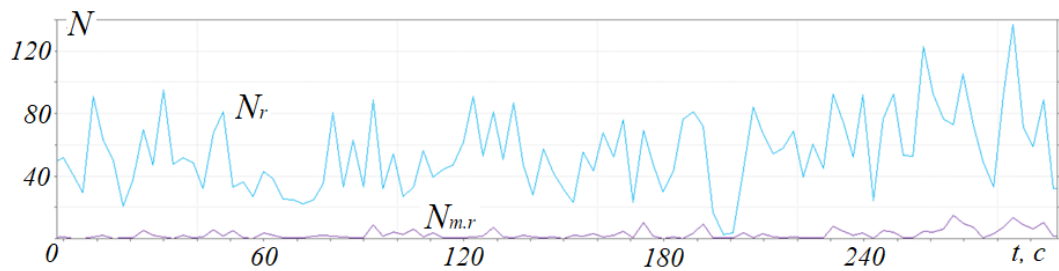
Для прикладу, можна навести фрагмент часового розподілу параметрів прийнятих і переданих кадрів із циклами перезапиту. Результати досліджень наведено на рис. 3.18.

Фрагмент моніторингу отримано для радіоканалу стандарту 802.11n, із смугою каналу 40 МГц частотного діапазону 2.4 ГГц [82]. Довжина радіоканалу становила 5 м. В радіоканалі були присутні: архітектурна перешкода із цегли та інтерференційні завади, як для типового приміщення, де існують 20-30 мереж в межах видимості приймального пристрою абонента.

Повна ефективна швидкість передачі інформації по радіоканалу буде залежати від кількості отриманих та переданих кадрів без помилок, враховуючи цикли перезапиту.



а)



б)

Рис. 3.18. Фрагмент моніторингу для: а – переданих та прийнятих кадрів MSDU;
б – циклів перезапиту

Враховуючи вирази (1.10), (3.2) і (3.3), ефективну швидкість передачі можна виразити як кількість вдало переданих та прийнятих кадрів, що передається у радіоканалі за визначений проміжок часу t :

$$V_{eff} = \frac{N_{eff} L_k}{t} = \frac{(N_{MSDU}^{Tx} + N_{MSDU}^{Rx}) L_k}{t}, \quad (3.43)$$

де N_{eff} – кількість вдало переданих та отриманих кадрів без помилок.

Для моніторингу застосуємо період спостереження із дискретним часом вимірювання 1 с. Тоді, враховуючи період спостереження 360 с, кількість циклів вимірювання у періоді спостереження складе $n=360$. Середньостатистичну кількість отриманої та переданої інформації можна отримати через вдало отримані або передані пакети або кадри MSDU:

$$N_{MSDU}^{Rx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{MSDU,i}^{Rx}, \quad (3.44)$$

$$N_{MSDU}^{Tx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{MSDU,i}^{Tx}, \quad (3.45)$$

де $N_{MSDU,i}^{Rx}$ і $N_{MSDU,i}^{Tx}$ – кількість отриманих та переданих кадрів за одиницю часу.

Поява помилки при передачі кадру та втрачені кадри зменшують кількість корисної інформації у радіоканалі, що передається за одиницю часу. Часові характеристики параметрів N_r і $N_{m,r}$ також мають випадковий характер. Тоді враховуючи (1.11) і (1.12), вираз для розрахунку максимальної кількості циклів перезапиту для вдалої передачі кадру, можна записати так:

$$N_r^m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_r + N_{m,r})_i, \quad (3.46)$$

При перевищенні границі кількості дозволених перезапиту, кадр вважається втраченим. Вираз (1.13) можна записати так:

$$N_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_f^i, \quad (3.47)$$

де N_f^i – кількість втрачених кадрів за один цикл моніторингу.

Враховуючи вирази (3.44), (3.45), (3.46) та (3.47), середньостатистичну кількість вдало відправлених та отриманих кадрів за період спостереження, можна розрахувати так:

$$N_{eff} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_{MSDU}^{Tx} + N_{MSDU}^{Rx} - (N_r + N_{m,r})_i - N_f^i - N_d^i), \quad (3.48)$$

де N_d^i – кількість кадрів, які були визначені як дублікат i , в більшості випадків, ним можна нехтувати.

Підставляючи вирази (3.48) та (3.13) у вираз (3.43) отримаємо модель оцінювання повної ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалі на основі статистичних параметрів програмно-апаратних засобів моніторингу, яку можна записати так:

$$V_{eff} = \frac{K(L_{MSDU} - L_{c.TCP/IP})}{tn} \sum_{i=1}^n (N_{MSDU}^{Tx} + N_{MSDU}^{Rx} - (N_r + N_{m,r})_i - N_f^i), \quad (3.49)$$

де K – коефіцієнт завантаження радіоканалу службовою інформацією, що генерує алгоритм моніторингу і в даному випадку становить 1,5.

Для визначення коефіцієнта завантаження необхідно здійснити тестову передачу даних на основі абонентського пристрою із моніторингом та без. Тоді, паралельно передається корисна інформація із бітовою швидкістю (V_m) та службова (V_c) (моніторинг). Таким чином, встановлено наступна залежність:

$$K = \frac{V_m + V_c}{V_m} \approx 1,5,$$

Запропонована модель (3.49), дає можливість оцінювати середньостатистичне значення ефективної швидкості передачі інформації за період спостереження у будь-якій точці розташування абонентського пристрою в зоні дії покриття мережі та враховує всі існуючі фактори впливу у тракці передачі інформації.

Параметр ефективної швидкості передачі інформації має випадковий розподіл у часі і його характеристика від довжини радіоканалу має виражені максимуми та мінімуми (флуктуації) [84–86]. Для врахування таких флуктуацій проаналізовано експериментальні дослідження радіоканалу стандарту 802.11n [82]. Залежності на графіках позначено відповідними кривими, які

характеризують типові умови у приміщенні: 1 – пряма видимість між передавачем та приймачем без завад; 2 – в радіоканалі існує архітектурна перешкода типу «дерево»; 3 – в радіоканалі існує дві перешкоди типу «дерево»; 4 – в радіоканалі існує одна перешкода типу «цегла»; 5 – в радіоканалі існує дві перешкоди типу «цегла»; 6 – в радіоканалі присутня інтерференційна завада; 7 – в радіоканалі присутня інтерференційна завада та існує одна перешкода типу «дерево»; 8 – в радіоканалі присутня інтерференційна завада та дві перешкоди типу «дерево»; 9 – в радіоканалі присутні дві інтерференційні завади при прямій видимості; 10 – в радіоканалі присутні дві інтерференційні завади та перешкода першого типу; 11 – в радіоканалі присутні дві інтерференційні завади та дві перешкоди типу «дерево». Для перешкод типу «цегла» із інтерференційними завадами результати мають схожий розподіл.

Графіки залежності кількості прийнятих та переданих кадрів від довжини радіоканалу наведено на рис. 3.19.

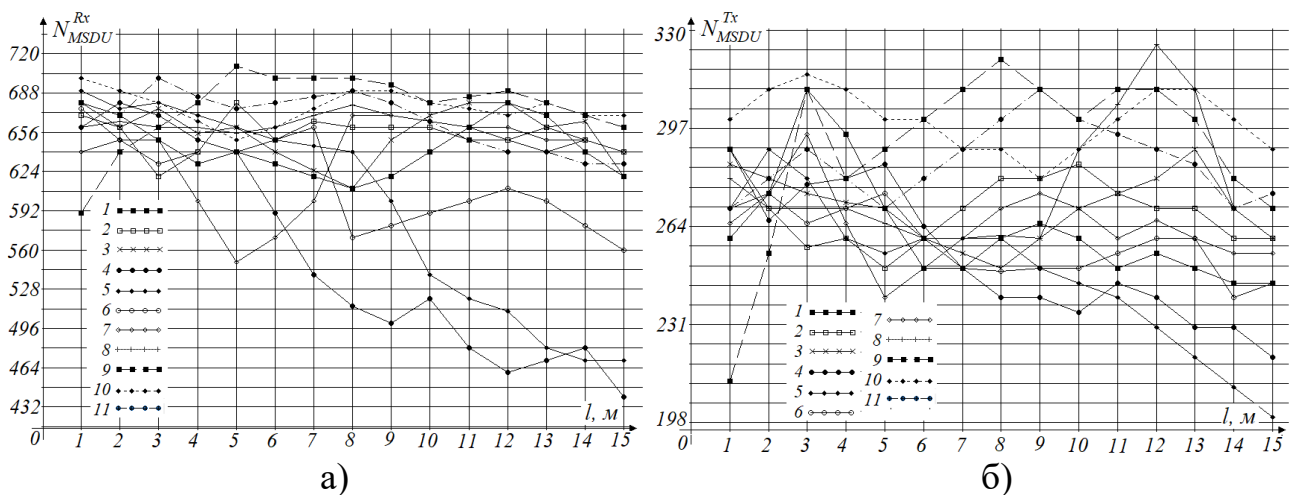


Рис. 3.19. Графіки залежності параметра N_{eff} від довжини радіоканалу для:
а – прийнятих кадрів; б – відправлених кадрів

Архітектурні перешкоди різного роду мають вплив, що залежить від товщини та густини матеріалу, а інтерференційні завади – від рівня випромінювання та кількості інформації, що генерують абоненти інших мереж. Якщо, не враховувати максимуми біля точки доступу, то застосовуючи методи

регресії можна отримати середньостатистичну залежність кількості прийнятих та переданих кадрів від довжини радіоканалу.

Таким чином, кількість вдало переданих та отриманих кадрів для радіоканалу, можна записати так:

$$N_{MSDU} = N_{MSDU}^{Tx} + N_{MSDU}^{Rx} = 2a_1 l + N_0^{Tx} + N_0^{Rx} + \Delta N, \quad (3.50)$$

або при існуванні перешкод із високою густиною:

$$N_{MSDU} = 2a_2 \ln l + N_0^{Tx} + N_0^{Rx} + \Delta N, \quad (3.51)$$

де a_1 і a_2 – коефіцієнти спадання регресії; N_0^{Tx} і N_0^{Rx} – початкові рівні регресії для переданих та прийнятих кадрів; ΔN – інтервал флуктуацій часових залежностей переданих та прийнятих кадрів.

На базі механізму створення повторної передачі кадру [62], отримано результати досліджень для вдало відправлених кадрів із врахуванням циклів повторної передачі, які наведено на рис. 3.20.

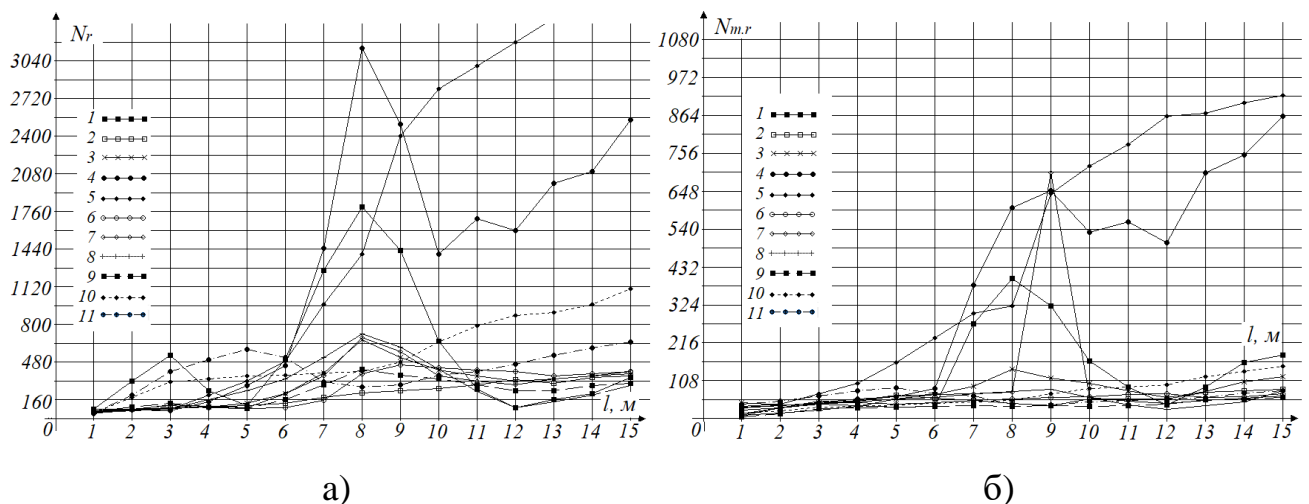


Рис. 3.20. Графіки залежності кількості запитів на повторну передачу від довжини радіоканалу для: а – N_r ; б – $N_{m,r}$

Результати регресійного аналізу показують поступове збільшення кількості циклів повторної передачі кадрів при збільшенні довжини радіоканалу. Особливо це стосується існування архітектурних перешкод з високою густиною. Але, для всіх випадків, залежність кількості циклів повторної передачі кадру від довжини радіоканалу можна записати так:

$$N_r = N_{0r} e^{(kl)} + \Delta N_r, \quad (3.52)$$

де k – коефіцієнт зростання регресії, N_{0r} – початковий рівень регресії; ΔN_r – інтервал флуктуацій параметра N_r .

Аналогічні залежності було отримано для параметрів $N_{m,r}$ та N_f :

$$N_{m,r} = N_{0m,r} e^{(k_1 l)} + \Delta N_{m,r}, \quad (3.53)$$

$$N_f = N_{0f} e^{(k_2 l)} + \Delta N_f, \quad (3.54)$$

де $N_{0m,r}$ і N_{0f} – початкові рівні регресій; $\Delta N_{m,r}$ і ΔN_f – інтервали флуктуацій параметрів $N_{m,r}$ і N_f відповідно.

Моделі (3.52), (3.53) та (3.54) мають однаковий характер, але із різними значеннями коефіцієнтів. Тому, враховуючи результати експериментальних досліджень на рис. 3.20, отримано зв'язок між цими коефіцієнтами на основі таких співвідношень:

$$s_1 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{r,i}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{m,r}} = \sum_{n=1}^n \frac{N_{0r}^i e^{(kl)}}{N_{0m,r}^i e^{(k_1 l)}}, \quad s_1 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{r,i}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_f} = \sum_{n=1}^n \frac{N_{0r}^i e^{(kl)}}{N_{0f}^i e^{(k_2 l)}}. \quad (3.55)$$

Подальший аналіз експериментальних досліджень, на основі виразів (3.55), дав можливість встановити наступні співвідношення:

$$N_{0r} \approx 4N_{0m.r} \approx 20N_{0f}, \quad (3.56)$$

$$k \approx k_1 \approx 2,5k_2. \quad (3.57)$$

Коефіцієнт регресії k , показує існування архітектурних перешкод і густину матеріалу. Для отриманих досліджень встановлено $k=0.1 \dots 0.3$, де нижнє значення це пряма видимість, а верхнє – існування перешкоди типу «цегла».

Підставимо (3.52), (3.53), (3.54), (3.56), (3.57), (3.50) і (3.51) у (3.49) та враховуючи, що моделі регресії отримані як середньостатистичні значення, отримаємо:

$$V_{eff} = \frac{K(L_{MSDU} - L_{c.TCP/IP})}{t} F(l) + N_0^{Tx} + N_0^{Rx} - \left(\frac{5}{4}e^{kl} + \frac{1}{20}e^{0,4kl}\right)N_{0r} \pm \Delta V, \quad (3.58)$$

$$F(l) = \begin{cases} (a_1^{Tx} + a_1^{Rx})l, & \text{для } 0,1 \leq k \leq 0,2, \\ (a_2^{Tx} + a_2^{Rx})\ln l, & \text{для } 0,2 < k \leq 0,3. \end{cases}$$

Флуктуації ΔV можна розрахувати на основі інтервалів флуктуацій параметрів моніторингу, як:

$$\Delta V = (\Delta N - \Delta N_r - \Delta N_{m.r} - \Delta N_f) \frac{K(L_{MSDU} - L_{c.TCP/IP})}{t}. \quad (3.59)$$

Модель (3.58) дає можливість оцінювати ефективну швидкість передачі інформації по всій довжині радіоканалу на основі статистичних параметрів програмно-апаратних засобів моніторингу. Така модель враховує дію факторів впливу та флуктуації ефективної швидкості передачі інформації на основі інтервалів флуктуацій часових залежностей параметрів моніторингу.

Використання параметру довжини радіоканалу дозволяє враховувати існування і вплив архітектурних перешкод та інтерференційних завад для будь-якого абонентського пристрою. Вплив перешкод та завад зменшує ефективну

швидкість передачі інформації що показують коефіцієнти a_1 , a_2 , і k . Такі коефіцієнти характеризують зміну основного інформаційного параметра при появі значних завад або перешкод у радіоканалі. Параметр ΔV показує флуктуації параметрів моніторингу в часі, що дозволяє оцінювати межі флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації при передачі будь-якого типу трафіку. Для підтвердження цього, проведено математичне дослідження моделі (3.58) при існуванні вказаних факторів впливу. Такі фактори створюють межі зміни коефіцієнтів затухання запропонованої моделі. Результати наведено на рис. 3.21.

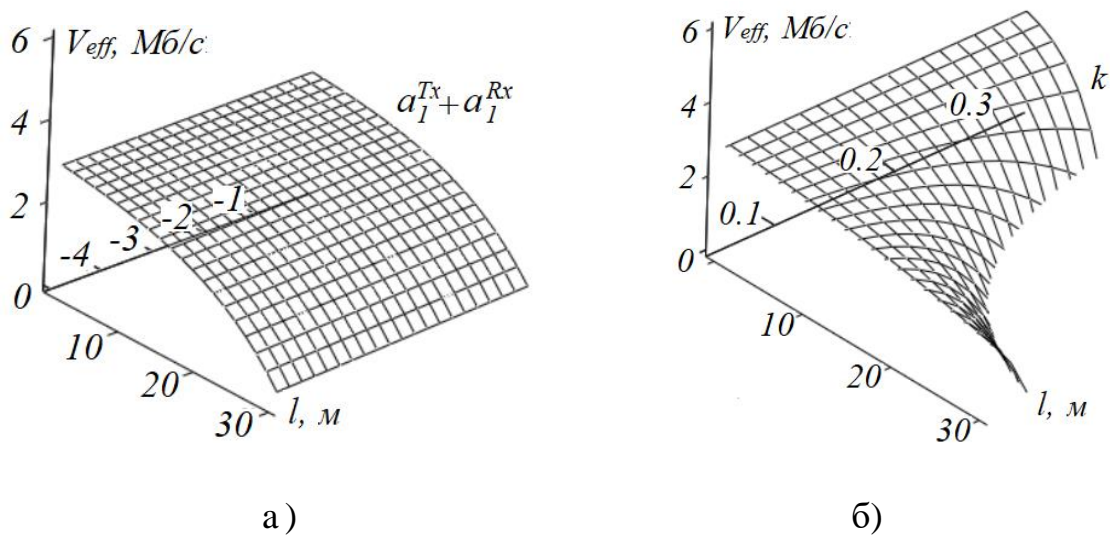


Рис. 3.21. Залежність V_{eff} від коефіцієнтів спадання для: а – переданих та прийнятих кадрів MSDU; б – для циклів повторної передачі кадрів

Інші параметри N^{Tx}_0 , N^{Rx}_0 і N_{or} , є найбільш точним врахуванням факторів впливу в реальному часі, які існують по всьому покритті мережі. Флуктуації цих параметрів задаються довірчими інтервалами ΔN_0 і ΔN_{or} . Результати математичних досліджень моделі (3.59) від вказаних параметрів наведено на рис. 3.22.

Як видно із отриманих результатів на рис. 3.21 і рис. 3.22, запропонована модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації, із використанням параметрів моніторингу, враховує максимальну кількість факторів впливу у радіоканалі.

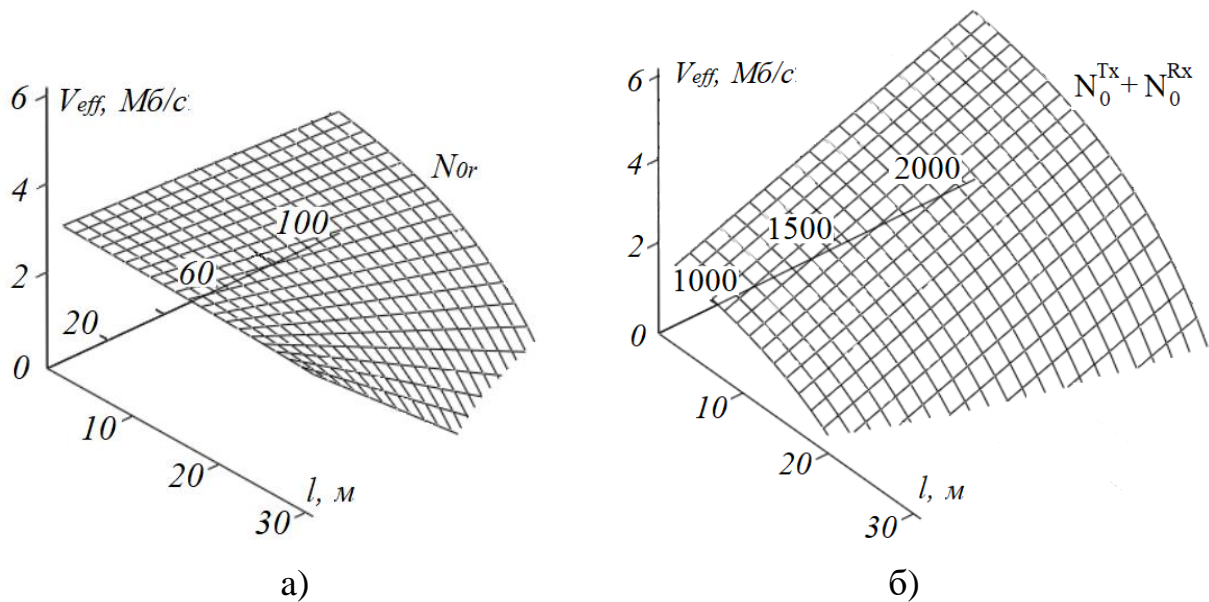


Рис. 3.22. Залежність V_{eff} від початкових рівнів для: а – переданих та прийнятих кадрів MSDU; б – для циклів повторної передачі кадрів

Достовірність результатів забезпечується вибором періоду спостереження за інформативним параметром та алгоритму моніторингу.

Отримані моделі дозволяють визначати ефективну швидкість передачі інформації у радіоканалі та враховують дію максимально-можливої кількості факторів впливу і є справедливими для будь-якого радіоканалу будь-якого радіоканалу стандартів 5G/Wi-Fi, частотного каналу, частотного діапазону та типу трафіку. Використання таких моделей можливо в режимі реального часу під час неперервної оптимізації мережі. Це потребує виконання ряду дій, тому для отримання результату із високою достовірністю, запропоновано метод визначення ефективної швидкості передачі інформації в радіоканалі на основі статистичних параметрів програмно-апаратних засобів моніторингу приймальних пристроїв, суть якого полягає в наступному.

На *першому етапі*, за допомогою програмно-апаратних засобів моніторингу, проводиться оцінювання середньостатистичних параметрів циклу передачі кадрів у радіоканалі. Для цього необхідно здійснити обмін тестовою інформацією, та отримати часовий розподіл параметрів N_{MSDU}^{Tx} , N_{MSDU}^{Rx} , N_r , $N_{m,r}$ та N_f . Як правило,

це можна здійснити на основі доступу до будь-якої інфокомунікаційної послуги (наприклад тест пропускної здатності інтернет з'єднання) та отримати середньостатистичні значення на основі виразів (3.44), (3.45), (3.46) і (3.47) із періодом спостереження 360 с.

На *другому етапі* розраховується ефективна швидкість передачі інформації у радіоканалі. Середньостатистичне значення ефективної швидкості передачі інформації за період спостереження у будь-якій точці розташування приймального пристрою в межах зони покриття мережі можна визначити так:

$$V_{eff}^{Rx} = V_{eff} - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (N_{MSDU}^{Tx} - (N_r + N_{m,r})_i - N_f^i). \quad (3.60)$$

Якщо використовується регресійна модель (3.58), то додатково необхідно визначити коефіцієнти регресії a_1 , a_2 , k і початкові рівні N_0^{Tx} , N_0^{Rx} , N_{0r} . Початкові рівні можна визначити на відстані двох метрів від точки доступу, якщо не враховувати максимум випромінювання (див. розділ 2). Тоді враховуючи (3.50), (3.51) і (3.52) отримаємо:

$$N_0^{Tx} + N_0^{Rx} \approx \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n (N_{MSDU,i}^{Tx} + N_{MSDU,i}^{Rx})}{4na_1}, & \text{для лінійної залежності,} \\ \frac{\sum_{i=1}^n (N_{MSDU,i}^{Tx} + N_{MSDU,i}^{Rx})}{1,4na_2}, & \text{для логарифмічної залежності.} \end{cases} \quad (3.61)$$

$$N_{0r} \approx \frac{\sum_{i=1}^n N_{r,i}}{ne^{2k}}. \quad (3.62)$$

На такій відстані вплив інтерференційних завад є мінімальними, тоді можна вважати, що для будь-якого приймально-передавального обладнання, буде справедлива нерівність:

$$N_0^{Rx} + N_0^{Tx} = N_{eff}. \quad (3.63)$$

Третій етап – оцінювання інтервалу флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації на основі виразу (3.59). Для цього розраховуються інтервали флуктуацій параметрів моніторингу ΔN , ΔN_r , $\Delta N_{m,r}$ і ΔN_f на основі наступної умови:

$$\Delta N_x \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\min N_x(t); \max N_x(t)). \quad (3.64)$$

де x – індекс відповідного параметра; \max – кількість максимумів на часовій характеристиці; \min – кількість мінімумів на часовій характеристиці.

На *четвертому етапі* отримується результат оцінювання ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням інтервалу флуктуацій та похибки оцінювання. Використовуючи нерівність (3.28), результат оцінювання можна записати так:

$$V_{eff}^{Rx} - \Delta V - \sigma_V \leq V < V_{eff}^{Rx} + \Delta V + \sigma_V. \quad (3.65)$$

Враховуючи вираз (2.36), випадкову похибку оцінювання можна розрахувати так:

$$\sigma_V = \sigma_{Tx} + \sigma_{Rx} + \sigma_r + \sigma_{m,r} + \sigma_f, \quad (3.66)$$

де σ_{Tx} – випадкова похибка оцінювання кількості переданих кадрів; σ_{Rx} – випадкова похибка оцінювання кількості прийнятих кадрів; σ_r – випадкова похибка оцінювання кількості циклів повторної передачі кадрів; $\sigma_{m,r}$ – випадкова похибка оцінювання кількості циклів повторної передачі кадрів більше одиниці; σ_f – випадкова похибка оцінювання кількості втрачених кадрів.

Всі параметри моніторингу мають випадковий характер на основі нормального закону розподілу (при використанні 360 вимірювань). Тоді складові виразу (3.66) будуть подібними, і враховуючи вираз (2.36) для імовірності 0,95 отримаємо:

$$\sigma_V \approx 5 \cdot \sigma_r \approx 0,5 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{r,i} - N_{r,i} \right| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{r,i} - N_{r,i} \right| \right)^2}. \quad (3.67)$$

Коефіцієнти оцінювання дії факторів впливу можна записати так:

$$K_r^T = \frac{N_{MSDU}^{Rx} + N_{MSDU}^{Tx}}{N_r + N_{m,r}} = \frac{2a_1 l + N_0^{Rx} + N_0^{Tx}}{1,25 N_{0r} e^{kl}}, \quad (3.68)$$

$$K_f^T = \frac{N_{MSDU}^{Rx} + N_{MSDU}^{Tx}}{N_f + N_d} = \frac{20(2a_1 l + N_0^{Rx} + N_0^{Tx})}{N_{0r} e^{0,4kl}}. \quad (3.69)$$

Призначення методу полягає у підвищенні ефективності визначення ефективної швидкості передачі інформації у приміщеннях на етапах неперервної оптимізації корпоративних телекомунікаційних мереж, використовуючи можливості спеціалізованого і абонентського обладнання та додатків моніторингу прикладного рівня, що є широко доступним та легко реалізується на практиці; оптимізація технічних параметрів корпоративних телекомунікаційних мереж із використанням програмно-апаратних засобів спеціалізованих або абонентських приймальних пристроїв; оцінювання дії різного роду факторів впливу та ефективності технологій покращення технічних параметрів радіоканалів в реальному часі.

Достовірність такого методу залежить від достовірності оцінювання параметрів моніторингу та точності вимірювання абонентського пристрою. Достовірність методу складає 0,95, а ступінь адекватності запропонованих моделей становить 0,9. До недоліків можна віднести: довжина радіоканалу до 40

м, недосить поширене обладнання що підтримує оцінювання всіх статистичних параметрів циклів передачі кадрів, та для високої достовірності необхідно мати базу визначених коефіцієнтів спадання для різного роду факторів впливу. Похибка оцінювання може досягати до 0,6 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для мінімальної дії факторів впливу у приміщенні.

Висновки до розділу 3

У розділі, на основі теоретичних та експериментальних досліджень, запропоновано новий метод, моделі та інтегральні показники визначення ефективної швидкості передачі інформації для будь-яких радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi для етапу поточної оптимізації.

В результаті проведених досліджень отримано наступні наукові та практичні результати.

1. Розвинуто математичну модель процесу передавання інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, яка використовує узагальнені поєднання технічних параметрів специфікацій стандартів, що у сукупності дає змогу оцінювати вплив різноманітних технологій та активність абонентів у мережі на кількість корисної інформації у радіоканалах.

2. Проведено ряд експериментальних досліджень радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, що дало змогу встановити наступні особливості їх роботи, які необхідно враховувати при операціях оцінювання:

- існування архітектурних перешкод збільшує рівень флуктуацій сигналу перед перешкодою та за нею. При цьому чим вища густина перешкоди тим більші затухання сигналу, із-за чого рівень флуктуацій зростає;

- існування архітектурних перешкод та двох активних радіоканалів у мережі, збільшує рівень флуктуацій відносно одного приблизно до 25% для високопродуктивних режимів. Це вказує на те, що при збільшенні кількості абонентів у мережі підвищується нестабільність параметрів радіоканалів.

Архітектурна перешкода із низькою густиною має низький коефіцієнт затухання сигналу, але при цьому створює додаткові поверхні відбиття для хвиль, що приводить до виникнення суттєвих флуктуацій біля перешкоди. При існуванні перешкод із більшою густиною або двох і більше, дає ефект зменшення рівня флуктуацій;

- параметр пропускної здатності фізичного рівня має пряму залежність від густини перешкоди. При цьому, існує граничне значення густини перешкоди нижче якого, пропускна здатність радіоканалу різко обмежується до параметрів еквівалентних режиму роботи із смугою 20 МГц. Це може бути критичним для передачі високоємного трафіку, але достатнім для багатьох пристроїв із концепції інтернету речей;

- на основі аналізу досліджень радіоканалів стандарту Wi-Fi, встановлено, що найбільш стабільним є радіоканал стандарту 802.11a, в якому характеристика ефективної швидкості передачі інформації є майже лінійною, а найбільш нестабільним – радіоканал 802.11ac із смугою 80 МГц. Це дозволяє стверджувати, що використання радіоканалів із більшою смугою пропускання приводить до підвищення ефективної швидкості передачі інформації, але з іншого боку підвищує вимоги до параметра сигнал/шум і збільшує рівень флуктуацій зменшуючи стабільність, що досить легко пояснюється значним зменшенням захисних смуг. Тоді, при існуванні значної кількості факторів впливу зона покриття із меншим частотним каналом буде більшою при меншому рівні інформаційних втрат;

- рівень флуктуацій основних параметрів є однаковим при використанні однакової смуги частотного каналу для будь-якого радіоканалу. Це дає підстави стверджувати, що збільшення смуги радіоканалу має пряму залежність із рівнем флуктуацій.

3. Формалізовано інтегральні показники ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації, які дають змогу прогнозувати інформаційні втрати в межах покриття мереж

радіодоступу із врахуванням архітектурних перешкод у корпоративних приміщеннях.

4. Встановлено, що параметри N_0 і N_{0r} , є найбільш точним врахуванням факторів впливу в реальному часі. Флуктуації цих параметрів можна виразити через інтервали ΔN_0 і ΔN_{0r} . При відсутності інтерференційних завад, відношення кількості втрачених пакетів N_f до кількості вдало переданих N_r становить приблизно 1:3, а відносно параметру $N_{m.r}$ приблизно 1:2. Всі інтервали флуктуацій параметрів моніторингу можна звести до одного параметра ΔV , який показує допустимі межі зміни основного інформативного параметра для встановлення придатності радіоканалу для передачі будь-якого типу трафіку.

5. Розроблено метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, який базується на поєднанні методів моніторингу та статистичного аналізу із використанням програмно-апаратних засобів спеціалізованих або абонентських приймальних пристроїв, що дало змогу покращити результативність управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах радіодоступу. Достовірність розробленого методу залежить від достовірності оцінювання параметрів програмно-апаратними засобами моніторингу приймального пристрою. При імовірності 0,95 похибка може досягати до $\pm 0,6$ Мб/с, що є меншим ніж рівень флуктуацій $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для мінімальної дії факторів впливу у приміщенні.

РОЗДІЛ 4. МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ГАРАНТОВАНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ РАДІОКАНАЛІВ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

В попередніх розділах запропоновано нові методи та моделі оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, що характеризуються високим рівнем достовірності та призначенні для процесу неперервної оптимізації на етапах експлуатації. Такі методи використовують період спостереження, що безпосередньо впливає на достовірність кінцевого результату оцінювання, особливо при врахуванні факторів впливу, що мають випадковий характер. Залежність достовірності від періоду спостереження значно зменшує швидкість отримання кінцевого результату оцінювання, особливо для ефективної швидкості передачі інформації. Тому в даному розділі, запропоновано метод, який підвищує швидкодію отримання результатів із застосуванням статистичного зв'язку між основними параметрами радіоканалу що теоретично передбачено виразами (3.8), (3.9) та (3.11). Як вхідний параметр, використано вимірювальне значення потужності сигналу на вході приймача.

4.1 Дослідження загальної моделі взаємозв'язку основних параметрів радіоканалу

Функціональний зв'язок між потужністю сигналу на вході приймача та пропускною здатністю показує формула Шеннона-Хартлі (1.4). Але для отримання залежностей в реальних умовах роботи радіоканалу та факторів впливу, має низьку точність. Для прикладу, розглянемо випадок, для рівня шумів у 1 *nВт* та радіоканалів із частотними каналами 20 МГц, 40 МГц та 80 МГц. Результати математичних досліджень наведено на рис. 4.1.

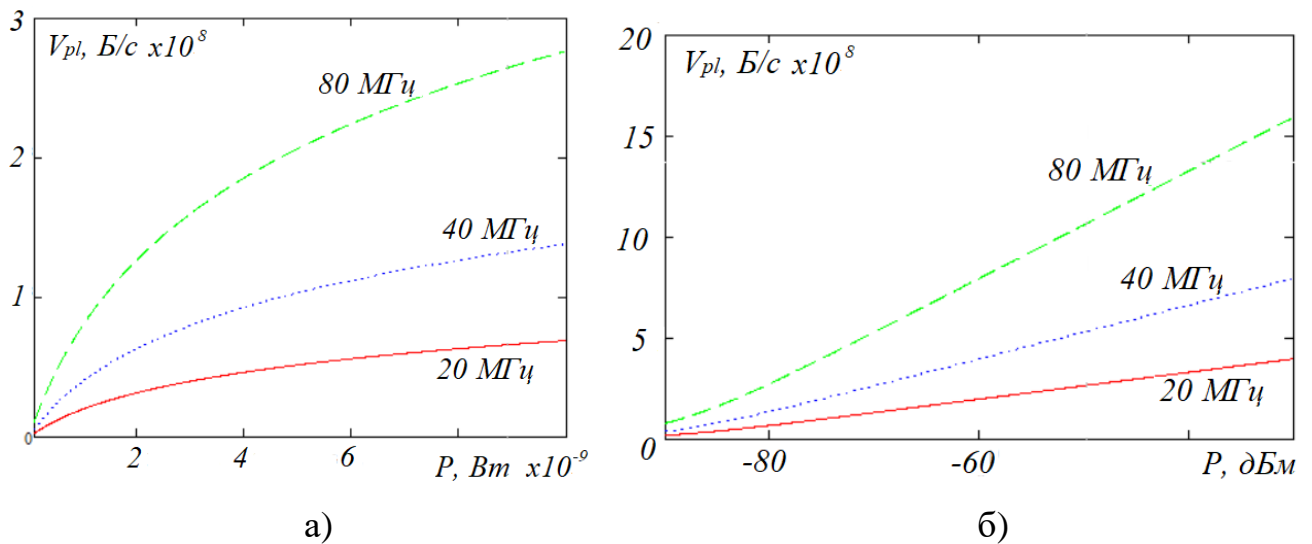


Рис. 4.1. Залежність пропускної здатності радіоканалу від: а – потужності сигналу на вході приймача у Вт; б – потужності сигналу на вході приймача у дБм;

Як показують результати на рис. 4.1, зміна потужності сигналу відповідає експериментальним дослідженням у розділі 2. Далі, розглянемо випадок існування у радіоканалі шумів та інтерференційних завад, що можна спостерігати в місцях де розгорнуті корпоративні телекомунікаційні мережі. Фрагмент моніторингу наведено на рис. 4.2.

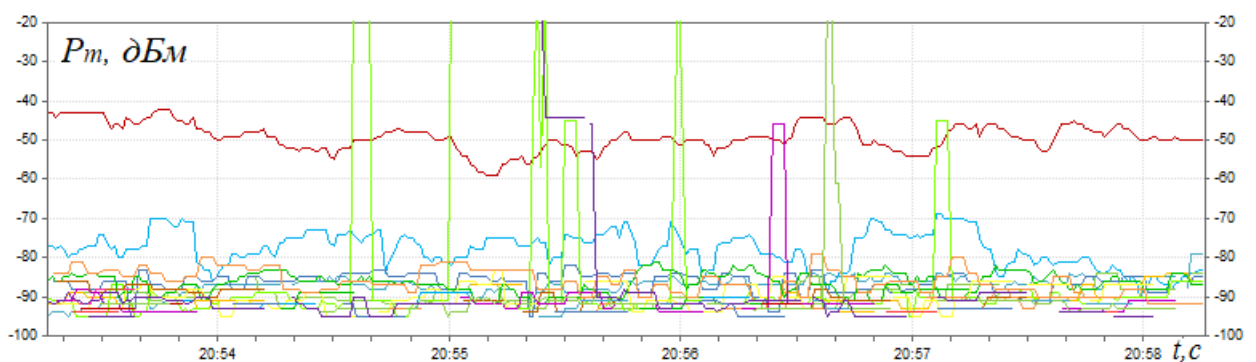


Рис. 4.2. Фрагмент моніторингу при існуванні інтерференційних завад та шумів

На рис. 4.2, спостерігаються значні флуктуації потужності сигналу на вході приймача та поява невідомих факторів впливу випадкового характеру, які видно

при збільшенні мінімумів. Вираз (1.4), при збільшенні рівня шумів дасть результат, який показано на рис. 4.3.

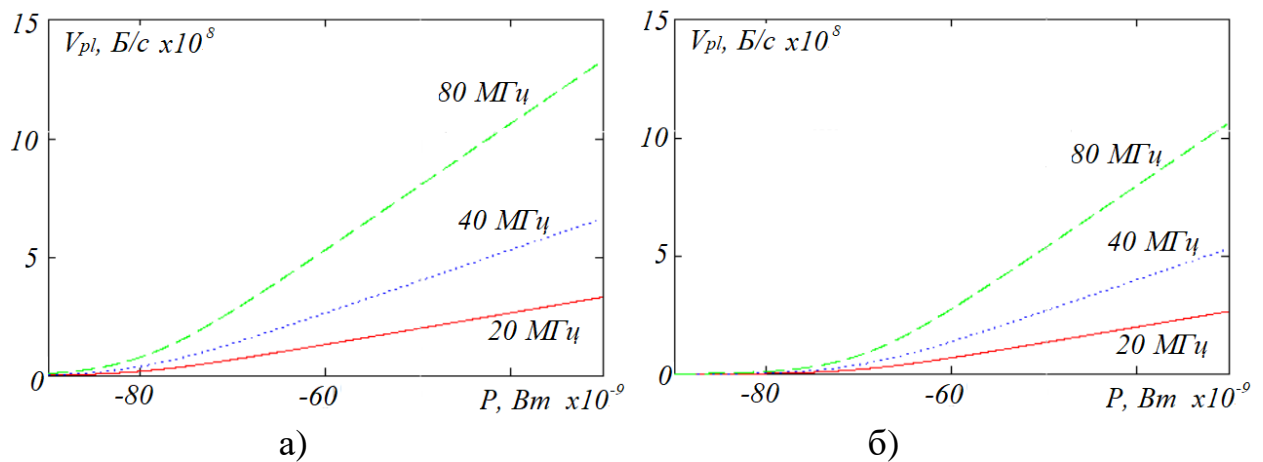


Рис. 4.3. Залежність пропускної здатності радіоканалу від потужності сигналу на вході приймача: а – для рівня шумів 10 нВт;
б – для рівня шумів 100 нВт

Далі розглянемо вираз (1.4) з точки зору ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалі, використовуючи однакові умови роботи для різних стандартів: одна та сама смуга каналу, один і той же рівень шумів, одне і те ж саме середнє значення потужності сигналу на вході приймача. Для цього, використано експериментальні дослідження для радіоканалів 802.11a, 802.11g та 802.11n із смугою 20 МГц та переведемо дБм у Вт [91]. Результати порівняння наведено на рис. 4.4.

Відмінність значень ефективної швидкості передачі інформації пояснюється існування різних технологій покращення технічних показників радіоканалу та різного ступеню захисту від завад та помилок на каналному і фізичному рівнях. Але вираз (1.4) показує функціональний зв'язок між пропускною здатністю каналу та потужністю сигналу на вході приймача, а ефективна швидкість передачі інформації це кількість корисної інформації на прикладному рівні.

Якщо, використовувати існуючі математичні моделі радіоканалів із врахуванням особливостей побудови та технологій для підвищення ефективності,

а також додати існування різного роду факторів впливу для розширення моделі (1.4), то можна отримати співвідношення, які будуть містити в собі значну кількість параметрів, певна кількість яких розрахувати досить складно.

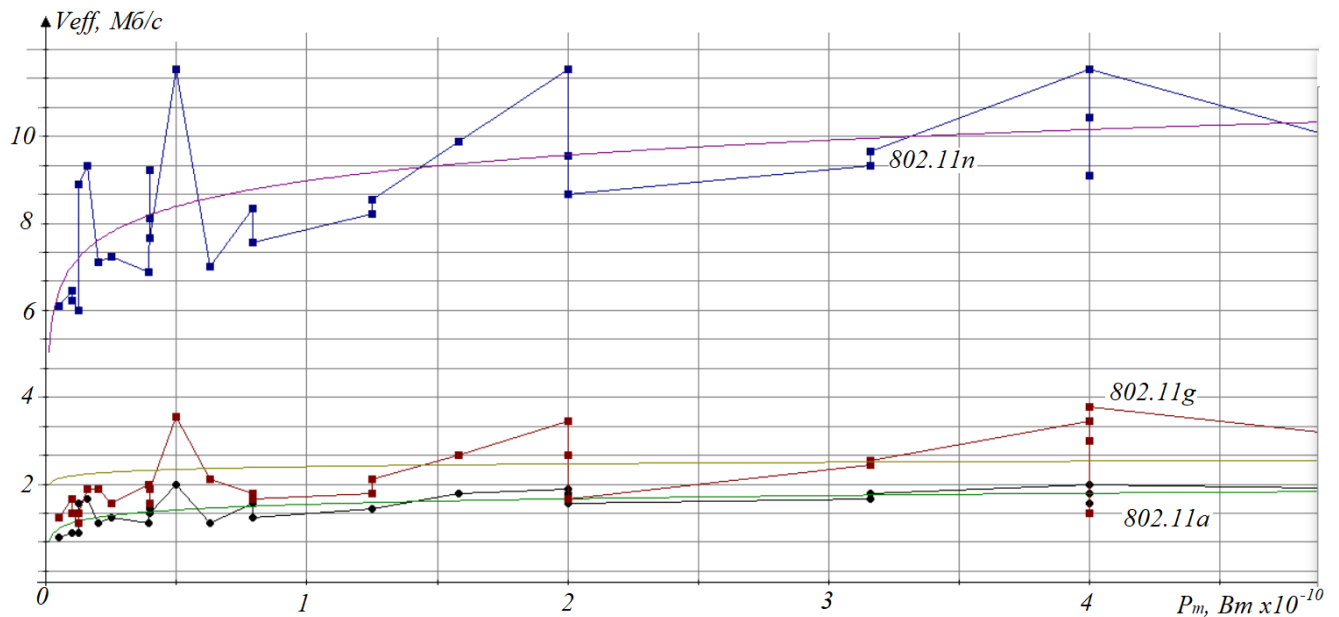


Рис. 4.4. Результати порівняння ефективної швидкості передачі інформації для різних стандартів при однаковому рівні сигналу на вході приймача

Це робить досить складним розробку методів оцінювання основних параметрів радіоканалів таким способом. Але використання функціонального зв'язку між основними параметрами радіоканалу робить можливим знаходження статистичного зв'язку на базі експериментальних досліджень. Для цього, на основі виразу коефіцієнта ефективності радіоканалу (3.1) запропоновано коефіцієнти інформаційної та енергетичної ефективностей із врахуванням факторів впливу. Таким чином, отримаємо:

$$K_P = \frac{V_{eff}}{P_{Rx}} f_1(S_c(x_1 \dots x_n), S_o(y_1 \dots y_m)), \quad (4.1)$$

$$K_V = \frac{V_{eff}}{V_{pl}} f_2(S_c(x_1 \dots x_n), S_o(y_1 \dots y_m)), \quad (4.2)$$

де $S_c(x_1 \dots x_n)$ – характеристика середовища передачі, яка залежить від сукупності параметрів x_n , до яких можна віднести затухання сигналу, потужність інтерференційних завад, потужність шумів, відстань між приймачем та передавачем і ін.; $S_o(y_1 \dots y_m)$ – характеристика обладнання, за допомогою якого створений радіоканал, яка залежить від сукупності параметрів y_m : потужність сигналу на вході приймача, рівень сигнал/шум, кількість помилок у прийнятих кадрах, кількість втрачених пакетів і ін.; f_1 і f_2 – функції зв'язку факторів впливу із основними параметрами радіоканалу.

Спільним параметром у виразах (4.1) і (4.2) є ефективна швидкість передачі інформації. Оцінювання такого параметру може бути виконана двома шляхами. Один із них – це застосування моделей оцінювання параметрів середовища передачі та обладнання (див. пп.3.2). До іншого можна віднести використання моделі на основі програмно-апаратних засобів моніторингу (див. пп. 3.4). В обох випадках найбільш достовірними будуть моделі, які отримані експериментальним шляхом.

З математичної точки зору, функції f_1 і f_2 можуть бути досить складними, так як враховують велику кількість параметрів, які, в деяких випадках, визначити майже неможливо. Але використовуючи результати експериментальних досліджень, такі функції можна замінити моделями регресій із врахуванням довжини радіоканалу. Моделі регресії повинні максимально відповідати реальним характеристикам радіоканалу. Тоді, модель оцінювання параметрів для виразів (4.1) і (4.2), можна записати так:

$$\begin{cases} V_{eff}(l) \approx f_b(l) + V_0, \\ V_{pl}(l) \approx f_c(l) + V_{pl,0}, \\ P_{Rx}(l) \approx f_a(l) + P_0, \end{cases} \quad (4.3)$$

де $f_a(l)$, $f_b(l)$, $f_c(l)$ – моделі регресії; V_0 , $V_{pl,0}$, P_0 – початкові значення моделей регресії для відповідних параметрів радіоканалу; l – довжина радіоканалу.

В моделі (4.3) є спільний параметр l , на основі якого, можна виразити один параметр через інший. Пропускна здатність радіоканалу визначається схемою MCS і значення її прописані у специфікаціях відповідного стандарту. Такий параметр можна використовувати як показник стабільності радіоканалу та ефективності роботи схеми MCS [215]. Тоді, параметр l виразимо через потужність сигналу та ефективну швидкість передачі інформації.

Використовуючи вираз (4.3) отримаємо:

$$\begin{cases} l \approx \frac{V_{eff}(l) - V_0}{b}, \\ l \approx \frac{P_{Rx}(l) - P_0}{a}, \end{cases} \quad (4.4)$$

де a і b – параметри затухання регресійних моделей $f_a(l)$ та $f_b(l)$, відповідно.

Підставляючи (4.4) в (4.3) отримаємо рівняння відповідності:

$$\begin{cases} V_{eff}(l) \approx \frac{b(P_{Rx}(l) + P_0)}{a} + V_0, \\ P_{Rx}(l) \approx \frac{a(V_{eff}(l) + V_0)}{b} + P_0. \end{cases} \quad (4.5)$$

Як відомо із розділу 2 та розділу 3, регресійні моделі основних параметрів радіоканалу можуть враховувати фактори впливу в комплексі, тому коефіцієнти інформаційної та енергетичної ефективності (4.1) (4.2) можна записати так:

$$K_P = \frac{V_{eff}(l)}{P_{Rx}(l)} = \frac{b(b(P_{Rx}(l) + P_0) + aV_0)}{a(a(V_{eff}(l) + V_0) + bP_0)}, \quad (4.6)$$

$$K_V = \frac{V_{eff}(l)}{V_{pl}} = \frac{b(P_{Rx}(l) + P_0) + aV_0}{aV_{pl}}. \quad (4.7)$$

Вирази (4.6) і (4.7) показують, що при відомому одному параметрі радіоканалу можна визначити інший. Як показує методика у розділі 2, оцінювання параметра потужності сигналу на вході приймача є відносно простою та доступною процедурою, що виконується на основі додатків моніторингу та можливостей будь-якого абонентського обладнання стандартів Wi-Fi в 5G. Використання таких виразів дає можливість значного підвищення швидкості оцінювання ефективної швидкості передачі інформації та стабільності радіоканалів, але для цього необхідно розробити модель статистичного зв'язку між основними параметрами радіоканалу.

4.2 Оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на базі статистичного зв'язку у просторі приміщень

Для розроблення моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на основі статистичного зв'язку, проведено ряд досліджень на базі мережі Wi-Fi у корпоративному приміщенні, в якій існував один активний радіоканал, як показано на рис. 4.5.

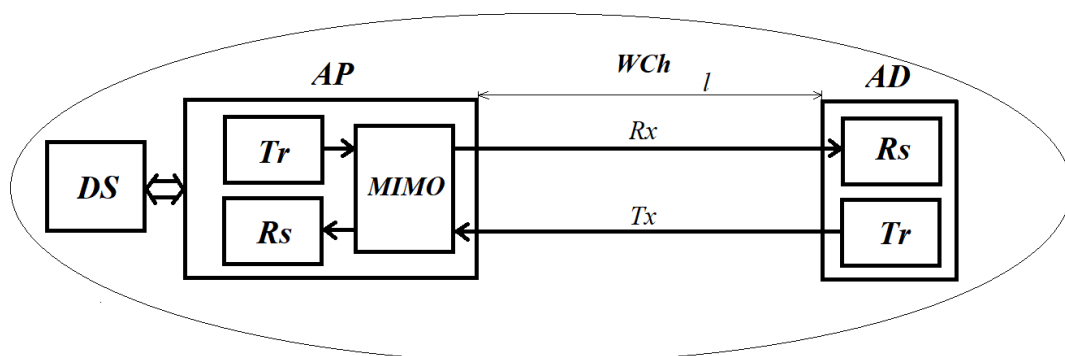


Рис. 4.5. Структура мережі для досліджень параметрів радіоканалу

Радіоканал (WCh) створено у приміщенні за допомогою точки доступу (AP) із підтримкою технології MIMO 3x3, та мобільного абонентського пристрою (AD) який містить одну антену, що є найбільш поширеним варіантом. У приміщенні довжина радіоканалу могла досягати l до 80 м для прямої видимості із

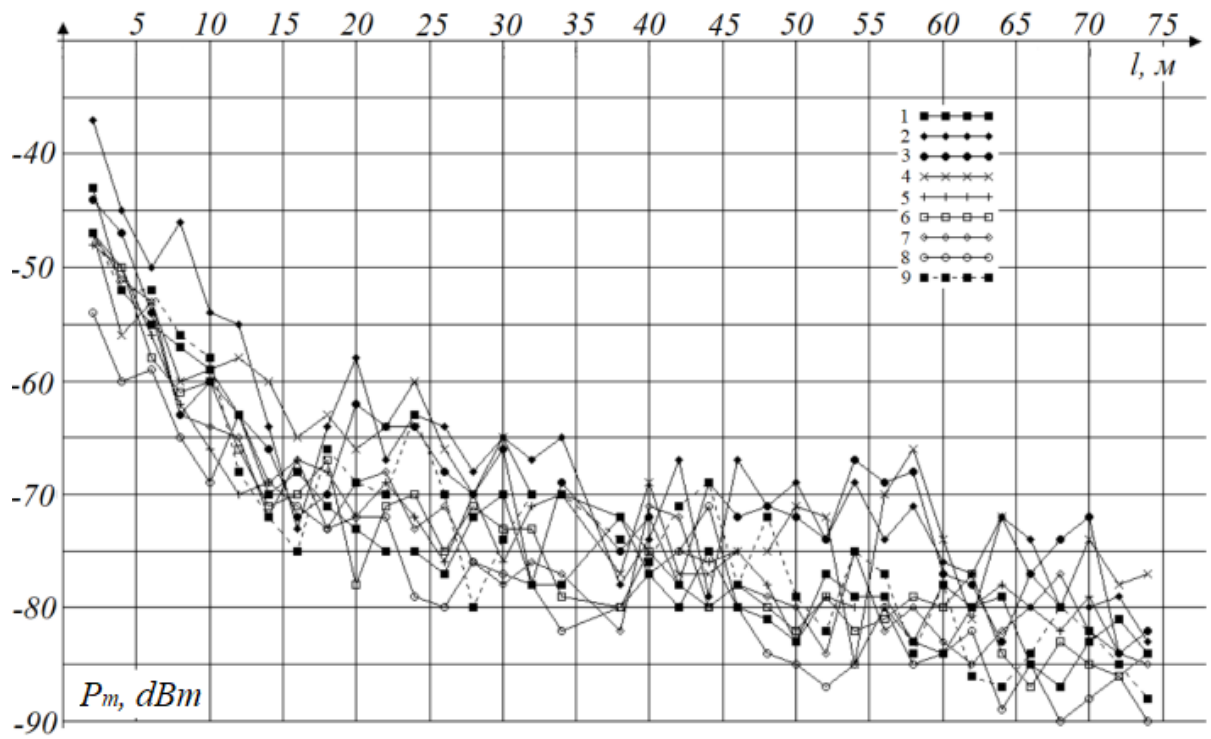
мінімальною кількістю відбиваючих поверхонь та впливом інтерференційних завад.

Основними інформативними параметрами обрано ефективну швидкість передачі інформації V_{eff} , пропускна здатність V_{pl} , потужність сигналу на вході приймача P_m , які можна отримати за допомогою програмно-апаратних засобів моніторингу та додатків прикладного рівня (див. розділ 1 та розділ 2). Оцінювання параметрів виконувалась шляхом усереднення результатів вимірювання для часу моніторингу 1 с та періоду спостереження 360 с на основі виразів (2.20) і (3.29).

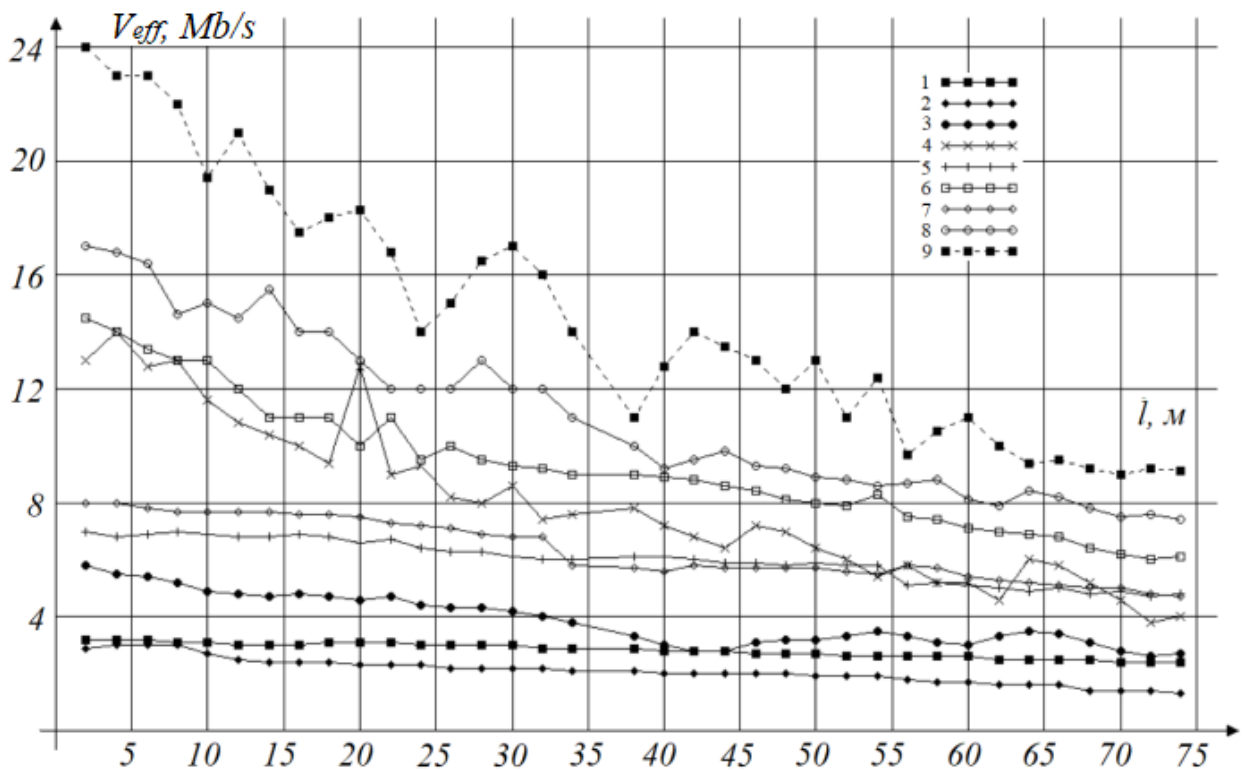
Для аналізу отриманих результатів експериментальних досліджень введено наступні види позначення на графіках: 1 – 802.11a; 2 – 802.11g; 3 – 802.11n (20 МГц, 2,4 ГГц); 4 – 802.11n (40 МГц, 2,4 ГГц); 5 – 802.11n (20 МГц, 5 ГГц); 6 – 802.11n (40 МГц, 5 ГГц); 7 – 802.11ac (20 МГц); 8 – 802.11ac (40 МГц); 9 – 802.11ac (80 МГц). Результати експериментальних досліджень основних параметрів радіоканалу, наведено на рис. 4.6 і рис. 4.7.

Як видно із отриманих результатів досліджень на рис. 4.6 а, рівень затухання та флуктуацій сигналу є подібним для всіх досліджуваних різновидів стандарту 802.11. Флуктуації сигналу та різниця між частотними діапазонами 2,4 ГГц і 5 ГГц мають однакове значення – 5..10 дБм. Низький рівень флуктуацій параметрів V_m і V_{pl} показують високу стабільність радіоканалів 802.11a та 802.11g. В них використовуються найбільше захисних смуг. Для таких радіоканалів багатопроменеве поширення хвиль та існування незначних архітектурних перешкод має мінімальний вплив.

Для стандарту 802.11n існує різниця в ефективній швидкості передачі інформації у частотних діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц. Це підтверджує те, що в сучасних реаліях завантаження діапазону 2,4 ГГц є досить високим і повністю виключити вплив інтерференційних завад та шумів є досить складною задачею.



а)



б)

Рис. 4.6. Результати досліджень основних параметрів радіоканалів: а – залежність потужності сигналу на вході приймача від довжини; б – залежність ефективної швидкості передачі інформації від довжини

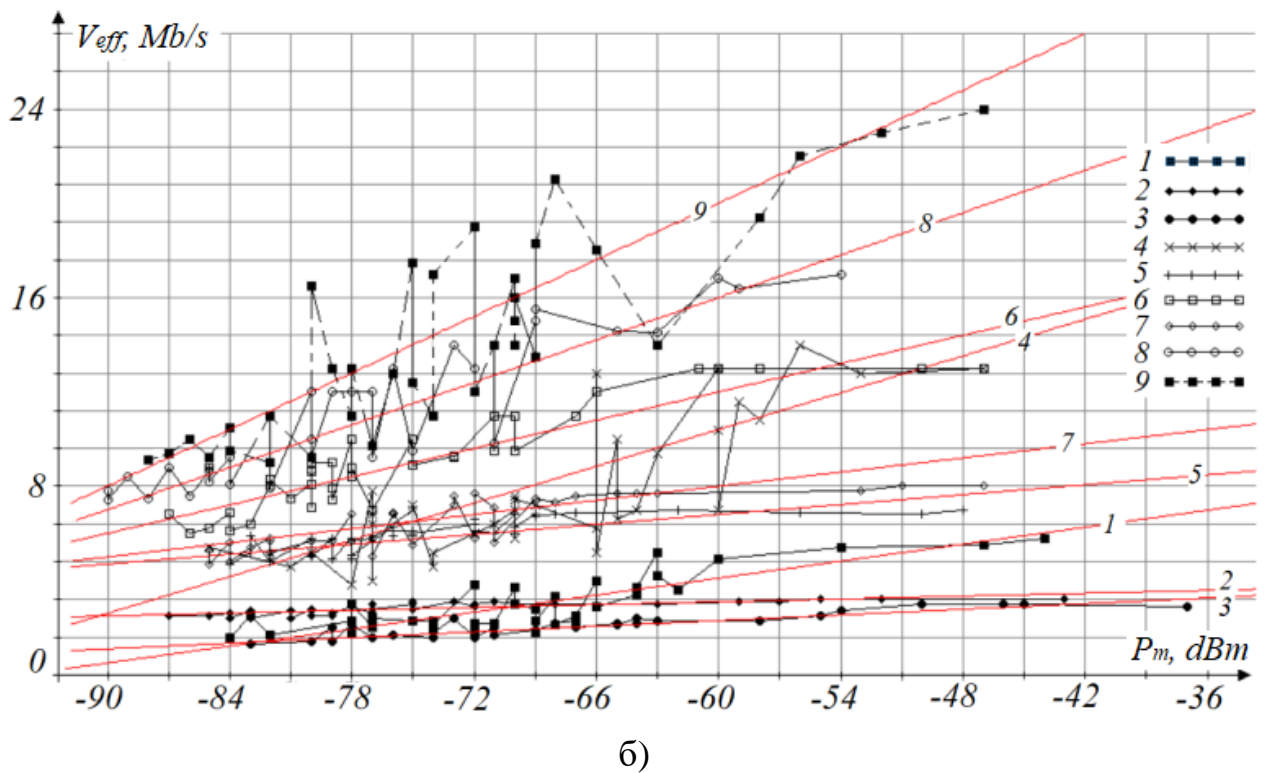
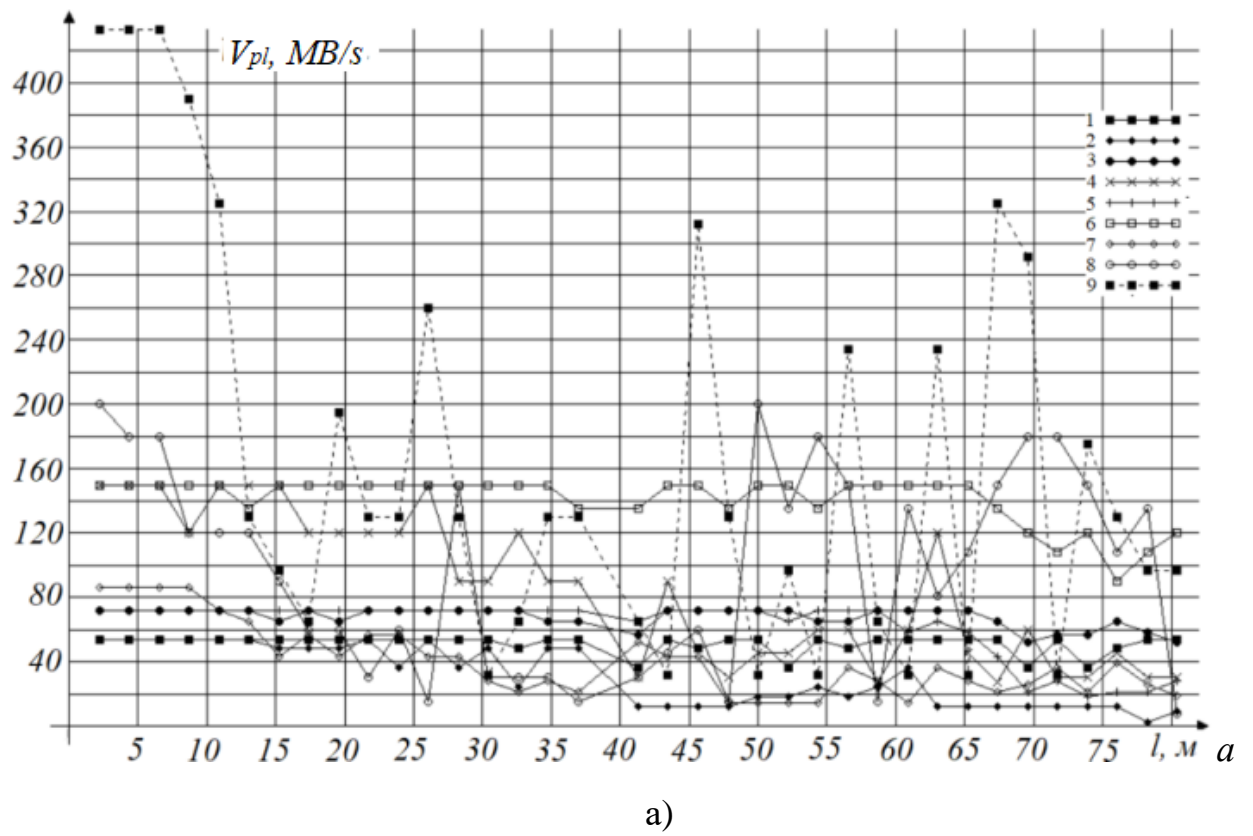


Рис. 4.7. Результати досліджень основних параметрів радіоканалів: а – залежність пропускної здатності від довжини; б – залежність ефективної швидкості передачі інформації від потужності сигналу на вході приймача

Виходячи із отриманих результатів, для отримання моделей регресій, для найбільш точного результату буде діапазон 5 ГГц. З іншого боку радіоканали у діапазоні 5 ГГц мають більшу нестабільність та більший коефіцієнт затухання сигналу. Для таких радіоканалів при рівні сигналу -80 дБм спостерігались перемикання V_{pl} до значень 1 МБ/с або 2 МБ/с, а також дуже часті розриви з'єднання.

Різниця в швидкодії радіоканалів різних стандартів 802.11 є передбачуваною та визначається різною оптимізацією та додатковими технологіями для передачі кадрів. Наприклад, стандарт 802.11ac використовує найменшу кількість захисних смуг та вищий порядок QAM. Це підвищує пропускну здатність радіоканалу, але значно зменшує ефективну довжину із-за високого рівня флуктуацій. Це можна прослідкувати за флуктуаціями параметра V_{pl} на рис. 4.7 а. Найбільшу нестабільність показав стандарт 802.11ac. Розриви з'єднання спостерігались при довжині 40 м і більше, де флуктуації становили $15..200$ МБ/с. Крім того, радіоканал із смугою 80 МГц втрачав з'єднання починаючи із 20 м при мінімальній зміні положення абонента. Також, з отриманих досліджень видно, що чим більша смуга частотного каналу, тим більшу ефективність радіоканалу можна отримати, але на близьких відстанях. Для стабільної передачі інформації на великі відстані більш ефективними є радіоканали із смугою 20 МГц, що відповідає дослідженням у попередніх розділах. Але, в будь-якому випадку, основні параметри радіоканалу мають флуктуації по всій довжині радіоканалу. Величина таких флуктуацій залежить від кількості та коефіцієнта дії факторів впливу. В приміщеннях, основним фактором впливу є багатопроменеве поширення хвиль (міжсимвольна інтерференція), що виникає із-за наявності відбиваючих поверхонь у приміщенні. В результаті цього, при оцінюванні основних параметрів радіоканалу, в різні моменти часу періоду спостереження, існують флуктуації, що видно на рис. 5.6 а, б, як максимуми та мінімуми на отриманих залежностях. Їх можна враховувати, як допустимі флуктуації основних параметрів, та визначити із експериментальних даних за допомогою наступних виразів:

$$\Delta P \approx \frac{1}{2} \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \max \{P_{m.i}\}_j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \min \{P_{m.i}\}_j \right), \quad (4.8)$$

$$\Delta V \approx \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left(\max \{V_{m.i}\}_j - \min \{V_{m.i}\}_j \right), \quad (4.9)$$

де n – кількість періодів спостереження для отримання експериментальних характеристик $P_m(l)$ і $V_{eff}(l)$.

Використовуючи вирази (4.7), (4.8) та результати на рис. 4.6, а, б, відповідність інтервалів флуктуацій для потужності сигналу на вході приймача ΔP та ефективної швидкості передачі інформації ΔV наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Інтервали флуктуацій вимірювальних параметрів

Пара метр	802.11a	802.11g	802.11n 20 МГц 2,4 ГГц	802.11n 40 МГц 2,4 ГГц	802.11n 20 МГц 5 ГГц	802.11n 40 МГц 5 ГГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
	ΔP , дБм	±4	±5	±5	±6	±4	±6	±5	±7
ΔV , Мб/с	±0,1	±0,2	±0,6	±2	±0,3	±1	±1	±1,2	±2

Враховуючи дослідження у пп. 3.2 і пп. 3.3, флуктуації основних параметрів ΔP і ΔV визначають границі флуктуацій одного параметра, що приводить до змін іншого, в межах, що не вплине на затримку при передачі кадрів.

Використовуючи методи регресійного аналізу та враховуючи інтервали флуктуацій, отримано моделі оцінювання основних параметрів радіоканалу, які можна записати так:

$$P_{Rx}(l) \approx \begin{cases} a_1 l + P_0 \pm \Delta P, & \text{для } l < 16\text{м,} \\ a_2 \ln(l) + P_0 \pm \Delta P, & \text{для } l < 80\text{м,} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$V_{eff}(l) \approx bl + V_0 \pm \Delta V, \quad (4.11)$$

де a_1 , b – коефіцієнти регресій $f_a(l)$ і $f_b(l)$ для лінійного закону; a_2 – коефіцієнт регресії $f_a(l)$ для логарифмічного закону. a_3 і a_4 – для квадратичного.

Коефіцієнти регресій отримано на основі результатів експериментальних досліджень із характеристик розподілу потужності сигналу та ефективної швидкості передачі інформації за довжиною радіоканалу на основі виразів (2.22) і (3.34).

Характеристику згасання сигналу по довжині радіоканалу можна умовно розділити на дві ділянки. Перша ділянка для коротких радіоканалів до 16 м. Це зона із високим коефіцієнтом згасання сигналу, в якій спостерігається найбільша стабільність радіоканалу. Після 16 м згасання є меншим, де характеристика має форму близьку до логарифмічної моделі, що умовно можна назвати для довгих радіоканалів. Це відповідає класичним моделям згасання сигналу [17]. Модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації є близькою до лінійної, а стандарти відрізняються між собою коефіцієнтами спадання, початковими значеннями та рівнем флуктуацій ΔV .

Враховуючи вирази оцінювання параметрів регресій (2.22) і (3.34) і виконуючи статистичну обробку результатів досліджень, було отримано наступні моделі:

$$P_{Rx}(l) \approx \begin{cases} -2l + P_0 \pm \Delta P, & \text{для } l < 16\text{ м;} \\ (-10 \pm 1,3) \ln(l) + P_0 \pm \Delta P, & \text{для } l < 80\text{ м;} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$V_{eff}(l) \approx \begin{cases} -0,2l + V_0 \pm \Delta V, & \text{для } \Delta f = 80\text{ МГц;} \\ -0,1l + V_0 \pm \Delta V, & \text{для } \Delta f = 40\text{ МГц;} \\ (-0,02 \pm 0,01)l + V_0 \pm \Delta V, & \text{для } \Delta f = 20\text{ МГц,} \end{cases} \quad (4.13)$$

де Δf – смуга частотного каналу.

Початковий рівень знаходиться в межах $P_0 \approx 40 \pm 4$ дБм, при існуванні флуктуацій $\Delta P = \pm 5..10$ дБм. Початкові рівні V_0 наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Початкові рівні для параметра V_0

802.11a	802.11g	802.11n 20 МГц 2,4 ГГц	802.11n 40 МГц 2,4 ГГц	802.11n 20 МГц 5 ГГц	802.11n 40 МГц 5 ГГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
3,2 <i>Мб/с</i>	2,8 <i>Мб/с</i>	5,3 <i>Мб/с</i>	12,2 <i>Мб/с</i>	7,2 <i>Мб/с</i>	13,2 <i>Мб/с</i>	8,2 <i>Мб/с</i>	16,2 <i>Мб/с</i>	23 <i>Мб/с</i>

Моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації та потужності сигналу на вході приймача містять середньостатистичні параметри регресії. В межах прямої видимості, такі параметри будуть справедливими для різноманітного приймально-передавального обладнання та різних корпоративних приміщень. Як і у розділі 2, врахуємо статичні та випадкові фактори впливу за допомогою вимірювального значення потужності сигналу P_m на відстані 2 м від точки доступу. Використовуючи модель (4.10), та беручи до уваги короткі та довгі радіоканали у приміщенні, вираз для розрахунку початкового значення потужності сигналу можна записати так:

$$P_0 = \begin{cases} P_m - 2a_1, & \text{для } l < 16\text{м;} \\ P_m - a_2 \ln 2, & \text{для } l < 80\text{м.} \end{cases} \quad (4.14)$$

Визначимо ефективну швидкість передачі інформації через потужність сигналу на вході приймача. Для цього, необхідно знайти зв'язок між характеристиками радіоканалу $V_{eff}(l)$ та $P_{Rx}(l)$. Це можна досягти двома шляхами. Перший з них, через коефіцієнт енергетичної ефективності радіоканалу. Підставляючи вирази (4.10), (4.11) і (4.14) у (4.6), отримаємо:

$$K_p = \begin{cases} \frac{bl + V_0 \pm \Delta V}{a_1 l + P_m - 2a_1 \pm \Delta P}, & \text{для } l < 16\text{м}; \\ \frac{bl + V_0 \pm \Delta V}{a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 \pm \Delta P}, & \text{для } l < 80\text{м}. \end{cases} \quad (4.15)$$

Другий шлях полягає у знаходженні моделі статистичного зв'язку між параметрами P_m і V_m для експериментальних залежностей на рис. 4.7 б з застосуванням методу регресії. Результати показано для кожного досліджуваного стандарту окремо, де лінії лінійної регресії проходять через усередненні точки (P_m^c і V_m^c). В такому випадку, можна отримати загальний наближений вираз моделі статистичного зв'язку:

$$V_{\text{eff}}(P_{Rx}) \approx K P_m + S_0, \quad (4.16)$$

де K і S_0 – коефіцієнти лінійної регресії, які наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Коефіцієнти моделі (4.15)

Пара метр	802.11a	802.11g	802.11n 20 МГц 2,4 ГГц	802.11n 40 МГц 2,4 ГГц	802.11n 20 МГц 5 ГГц	802.11n 40 МГц 5 ГГц	802.11ac 20 МГц	802.11ac 40 МГц	802.11ac 80 МГц
K	0,02	0,04	0,12	0,2	0,07	0,22	0,1	0,3	0,38
S_0	4,3	4,7	11	24	11	26	14	34	44

Лінійна регресія дає просту модель зв'язку, але для деяких стандартів вносить незначну похибку. Враховуючи флуктуації ΔV і ΔP ця похибка знаходиться в допустимих межах.

На основі математичного дослідження визначимо оптимальний варіант зв'язку між основними параметрами радіоканалу із застосуванням умови $l < 80$ м

для виразів (4.15) та (4.16) (моделювання виразу (4.16) із врахуванням виразу (4.10)).

Результати математичного дослідження наведено на рис. 4.8.

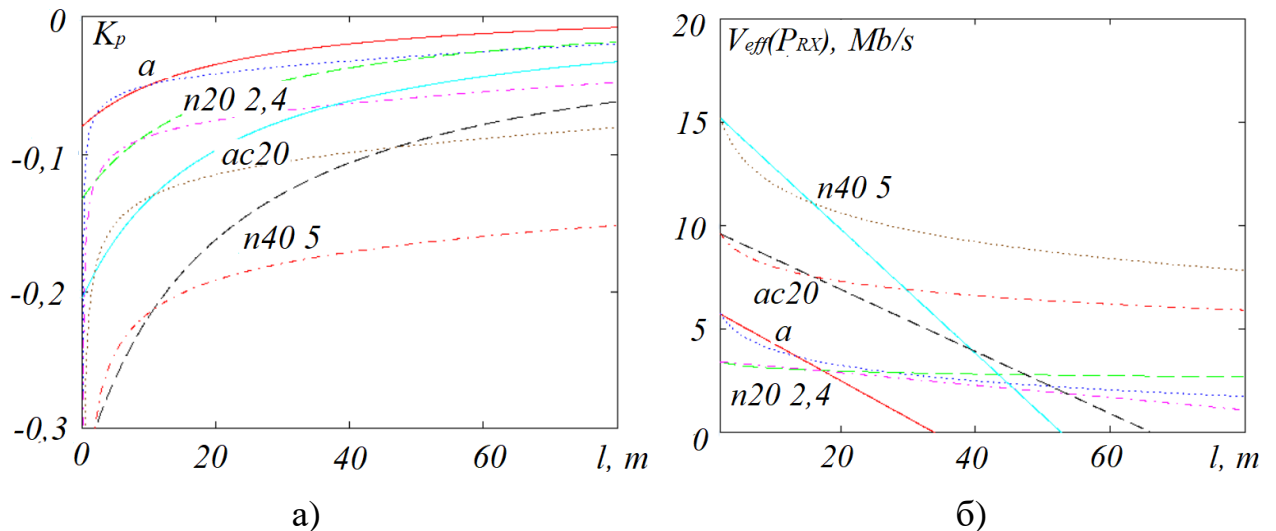


Рис. 4.8. Результати досліджень моделей зв'язку між основними параметрами радіоканалу для: а – K_p ; б – $V_{eff}(P_{RX})$.

Як видно із результатів досліджень на рис. 4.8, використовуючи коефіцієнт енергетичної ефективності K_p , виникає значна похибка при зміщенні точок перетину лінійної та логарифмічної моделі, відносно моделі статистичного зв'язку $V_{eff}(P_{RX})$. В результаті, це приводить до відхилення математичної оцінки ефективної швидкості передачі інформації та реальних значень.

Тоді, доцільно використовувати регресійну модель статистичного зв'язку, що дає найбільш достовірний результат. Таким чином, підставляючи (4.10) і (4.14) у (4.16), отримаємо:

$$V_{eff}(l) \approx \begin{cases} K(a_1 l + P_m - 2a_1 \pm \Delta P) + S_0, & \text{для } l \leq 16 \text{ м;} \\ K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 \pm \Delta P) + S_0, & \text{для } l > 16 \text{ м.} \end{cases} \quad (4.17)$$

Модель (4.17) дозволяє оцінювати ефективну швидкість передачі інформації для будь-якого радіоканалу із врахуванням його довжини, використовуючи тільки

основний енергетичний параметр. Оскільки, кожен приймальний пристрій має вбудовані засоби вимірювання потужності прийнятого сигналу, то таке оцінювання можна виконувати в реальному часі та для всіх радіоканалів відповідного стандарту одночасно.

Для перевірки отриманої моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на базі статистичного зв'язку проведемо математичне дослідження радіоканалу 802.11n діапазону 2,4 ГГц із смугою частотного каналу 40 МГц. Результати дослідження моделі (4.16) із врахуванням меж зміни вимірювального параметра P_m , наведено на рис. 4.9.

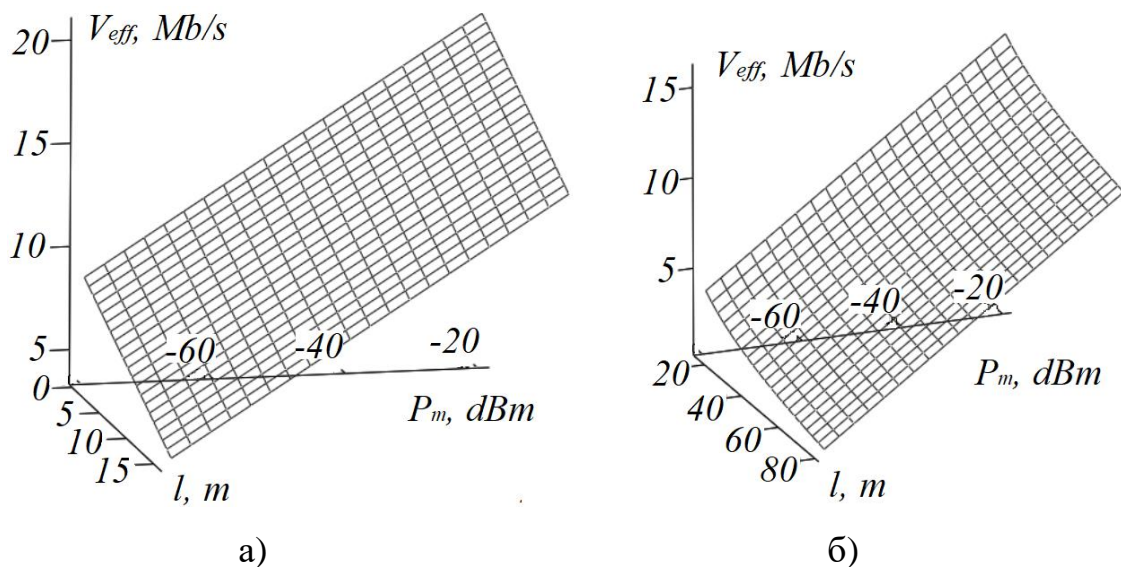


Рис. 4.9. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від вимірювальної потужності сигналу для: а – $l \leq 16$ м; б – $l > 16$ м

Як видно із графіків на рис. 4.9, результати моделювання відповідають експериментальним дослідженням. Похибка між ними знаходиться в межах інтервалів флуктуацій. Рівень адекватності такої моделі залежить від двох складових: достовірності вимірювання параметрів P_m та V_m , що розглянуто в розділі 2 та розділі 3 відповідно, на основі яких отримані коефіцієнти регресії K і S_0 та характеристик абонентських пристроїв, за допомогою яких виконується оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на проектування корпоративних телекомунікаційних мереж.

4.3 Розроблення методу оцінювання гарантованої пропускну́ї здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж

Для врахування ефекту багатопроменевого поширення хвиль, що є основною причиною виникнення міжсимвольної інтерференції у корпоративних приміщеннях, можна використовувати квадратичну модель, оскільки за 3-4 м біля стін флуктуації енергетичного параметра збільшуються. В такому випадку, нехтуючи максимумом випромінювання біля ТД, для залежностей на рис. 4.6 а отримаємо квадратичну модель, яку можна записати так:

$$P_{Rx}(l) \approx a_3^2 l^2 + a_4 l + P_0, \quad \text{для } l < 40 \text{ м}, \quad (4.18)$$

де a_3 і a_4 – коефіцієнт регресії $f_a(l)$ для квадратичного закону.

Використовуючи вимірювання P_m на відстані 2 м від точки доступу, початкове значення потужності сигналу можна розрахувати так:

$$P_0 = P_m - 4a_3 - 2a_4. \quad (4.19)$$

Підставляючи (4.19) у квадратичну модель (4.18), вираз (4.16) набуде наступного вигляду:

$$V_{eff}(l) \approx K(a_3(l^2 - 4) + a_4(l - 2) + P_m) + S_0. \quad (4.20)$$

Отримана модель дає можливість оцінювати ефективну швидкість передачі інформації для будь-яких радіоканалів довжиною до 40 м у корпоративних приміщеннях в умовах прямої видимості із мінімальною кількістю відбиваючих поверхонь. Додатковою можливістю такої моделі може бути використання інтервалів флуктуацій для коефіцієнтів затухання a_3 та a_4 . При використанні симетричності таких коефіцієнтів відносно нуля, можливо отримати еквівалент

рівня флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації біля стін та кутів приміщення, що спричинені міжсимвольною інтерференцією.

Для перевірки моделі (4.19), виконано математичне дослідження радіоканалів 802.11n діапазону 2,4 ГГц та 802.11ac, частотного каналу із смугою 40 МГц, враховуючи флуктуації для коефіцієнтів затухання. Результати наведено на рис. 4.10.

Як видно із графіків на рис. 4.10, за допомогою моделі (4.20), можна оцінювати ефективну швидкість передачі інформації для кожного абонента індивідуально, враховуючи існуючі в даний момент всі фактори впливу, параметри обладнання та його розташування у просторі. Сумарна дія всіх існуючих факторів впливу у радіоканалі враховуються на основі параметра P_m .

Як встановлено у розділах 2 і 3, сумарну дію факторів впливу можна визначити на основі інтервалів флуктуацій ΔV і ΔP . Тоді, модель (4.20) може мати два випадки, які можна записати так:

$$V_{eff}(l) \approx K(a_3(l^2 - 4) + a_4(l - 2) + P_m \pm \Delta P) + S_0, \quad (4.21)$$

$$V_{eff}(l) \approx K(a_3(l^2 - 4) + a_4(l - 2) + P_m) + S_0 \pm \Delta V. \quad (4.22)$$

Для визначення оптимального варіанту проведемо математичне моделювання, результати якого наведено на рис. 4.11.

Як видно із графіків на рис. 4.11, різниця кінцевого результату оцінювання, при використанні параметрів ΔV і ΔP , може складати до 3 Мб/с та до 5 м для довжини радіоканалу. Враховуючи результати робіт [84, 86], така похибка може збільшитись у 2..3 рази в залежності від кількості об'єктів у приміщенні та існування архітектурних перешкод, де флуктуації потужності можуть досягати до ± 15 дБм. Тому, в такому випадку виникає двояка ситуація. З одного боку, для оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалу для передачі різних видів трафіку, можливо застосовувати флуктуації сигналу ΔP .

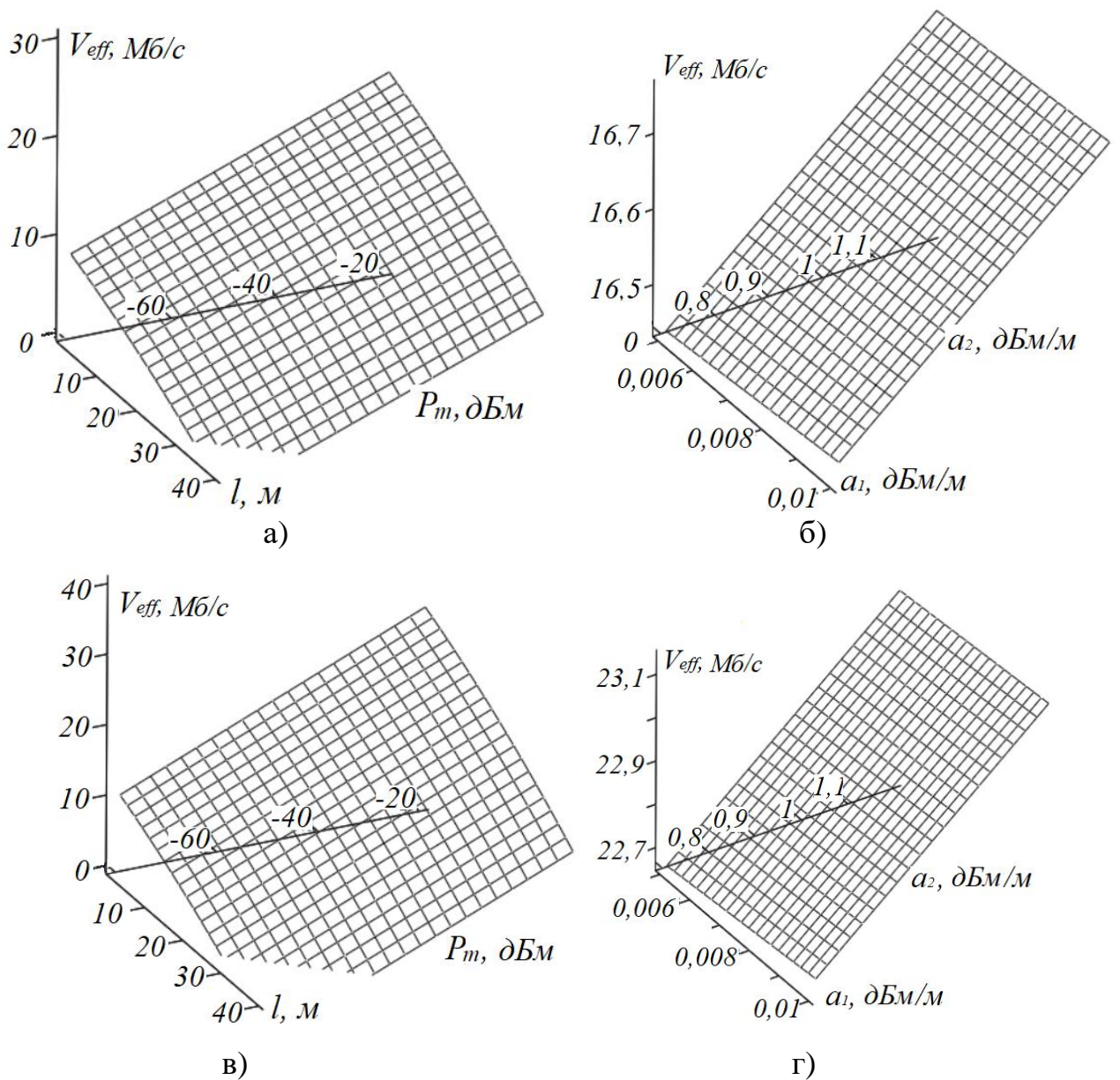


Рис. 4.10. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від: а – вимірювального значення потужності сигналу для стандарту 802.11n; б – коефіцієнтів згасання сигналу для стандарту 802.11n; в – вимірювального значення потужності сигналу для стандарту 802.11ac; г – коефіцієнтів згасання сигналу для стандарту 802.11ac.

Це в більшості випадків дасть похибку оцінювання, що не перевищить 3 Мб/с, або покаже меншу ефективність радіоканалу ніж реальна. З іншого боку, для підвищення достовірності оцінювання необхідно використовувати параметр

ΔV , але при цьому необхідно мати наперед визначену базу даних можливих флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації від дії факторів впливу.

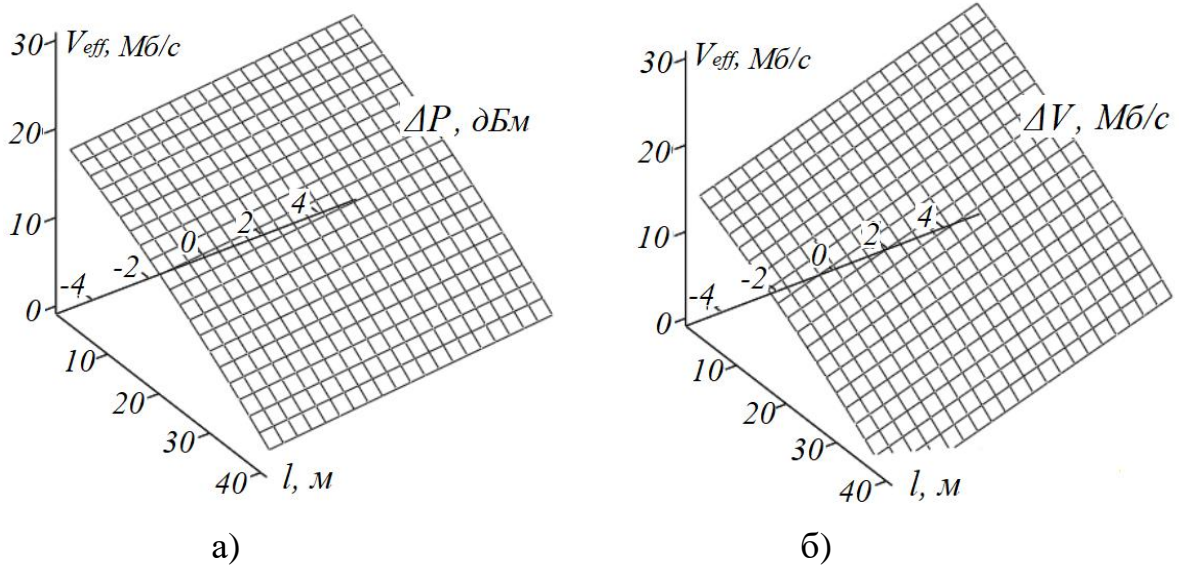


Рис. 4.11. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від; а – флуктуацій сигналу; б – флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації

Враховуючи статистичний аналіз результатів на рис. 4.6 і рис. 4.7 для параметрів ΔV і ΔP , можна отримати наступні співвідношення між різновидами стандартів:

$$\begin{aligned} \Delta V_{ac80} &\approx 1,6\Delta V_{ac40} \approx 2\Delta V_{ac20} \approx 2\Delta V_{n40}^5 \approx 6,7\Delta V_{n20}^5 \approx \\ &\approx 2\Delta V_{n40}^{2,4} \approx \Delta V_{n40}^{2,4} \approx 13,4\Delta V_{n20}^{2,4} \approx 10\Delta V_g \approx 20\Delta V_a, \\ \Delta P_{ac80} &\approx 1,5\Delta P_{n40}^{2,4} \approx 1,5\Delta P_{n40}^5 \approx 2\Delta P_a. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Отримані співвідношення показують більший рівень флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації в діапазоні 2,4 ГГц відносно діапазону 5 ГГц. Також, флуктуації збільшуються у сучасніших стандартах та із розширенням смуги частотного каналу. Для потужності сигналу рівень флуктуації є схожим для всіх стандартів, і для прямої видимості найбільша різниця між стандартами

802.11a та 802.11ac, але це входить в межі флуктуацій ± 5 дБм, що має мінімальний вплив на інтервал ΔV .

Модель (4.20) є аналогічною моделям отриманим у розділі 2 для просторового розподілу сигналу. При існуванні флуктуацій сигналу та їх збільшенні біля стін, просторовий розподіл за кожною координатою буде близьким до квадратичної функції. Тоді, використовуючи модель на основі статистичного зв'язку можна отримати відповідні просторові розподіли ефективної швидкості передачі інформації у приміщенні.

Підставляючи вираз (2.25) у (4.16), модель для оцінювання просторового розподілу ефективної швидкості передачі інформації для діапазону 2,4 ГГц та випадку кутового положення точки доступу, можна записати так:

$$V_{eff}(l) \approx K \left(\frac{1}{2}c(l^2 - 1) + \frac{1}{2}g(l - 1) + \frac{1}{2}a(3d^2 / 4 - dd_0 / 2 - d_0^2) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2}b(d / 2 - d_0) + P_m \pm \Delta P \right) + S_0. \quad (4.24)$$

Підставляючи вираз (2.29) у (4.16), модель оцінювання просторового розподілу ефективної швидкості передачі інформації для діапазону 2,4 ГГц та випадку центрального положення точки доступу, можна записати так:

$$V_{eff}(l) \approx K \left(\frac{3}{8}(cl^2 + ad^2) - c(l - 2) + g\left(\frac{1}{4}l - 1\right) + \frac{1}{4}bd + P_m \pm \Delta P \right) + S_0. \quad (4.25)$$

Підставляючи вираз (2.31) у (4.16), модель для оцінювання просторового розподілу ефективної швидкості передачі інформації для діапазону 5 ГГц та випадку кутового та центрального положення точки доступу, можна записати так:

$$V_{eff}(l) \approx K \left(\frac{5}{8}(cl^2 + ad^2) + \frac{1}{4}(gl + bd) - c(l + 2) - g + P_m \pm \Delta P \right) + S_0. \quad (4.26)$$

Вплив висоти розташування приймальних та передавальних антен буде визначатись на основі коефіцієнтів затухання, які є наперед визначеними із експериментальних досліджень у розділі 2.

Для визначення границь моделей проведено математичні дослідження для середньостатистичних значень коефіцієнтів затухання стандарту 802.11n (40 МГц) які отримані в пп. 4.2. Для спрощення досліджень розглянемо один із найбільш поширених випадків розташування пристроїв по висоті приміщення на рівні 1,5 м. Якщо враховувати, що точка доступу знаходиться на початку координатної сітки, тоді для приміщення із розмірами (l, d) , початок координат буде у точці $(0, d/2)$ для кутового положення. Результати досліджень показано на рис. 4.12.

Як видно із графіків на рис. 4.12, просторовий розподіл ефективної швидкості передачі інформації є подібним до розподілу потужності сигналу у приміщенні. При цьому, основний параметр оцінювання, є вимірювальне значення потужності сигналу на вході приймача, який залежить від існування факторів впливу у радіоканалі та положення абонентського пристрою у просторі відносно ТД. Запропоновані моделі враховують затухання сигналу біля стін та кутів приміщення, що виникає із-за багатопроменевого поширення хвиль.

Для випадку центрального положення візьмемо середньостатистичні значення коефіцієнтів затухання для стандарту 802.11ac (20 МГц) із досліджень у пп. 4.2. Враховуючи, що для центрального положення початкова точка знаходиться за координатами $(l/2, d/2)$, результати досліджень показано на рис. 4.13.

Для центрального положення точки доступу спостерігається несиметричність просторового розподілу. Це пов'язано із нерівномірністю діаграмами спрямованості антенної системи, що досить часто спостерігається у передавальних пристроїв. На графіках рис. 4.12 і рис. 4.13, у діапазоні 5 ГГц спостерігається більший спад ефективної швидкості передачі інформації від відстані ніж для діапазону 2,4 ГГц. Але при дослідженнях для прямої видимості цей параметр має більше значення при однакових умовах та однакових смугах

частотних каналів. Це пояснюється досить високим завантаженням діапазону 2,4 ГГц інтерференційними та шумовими завадами.

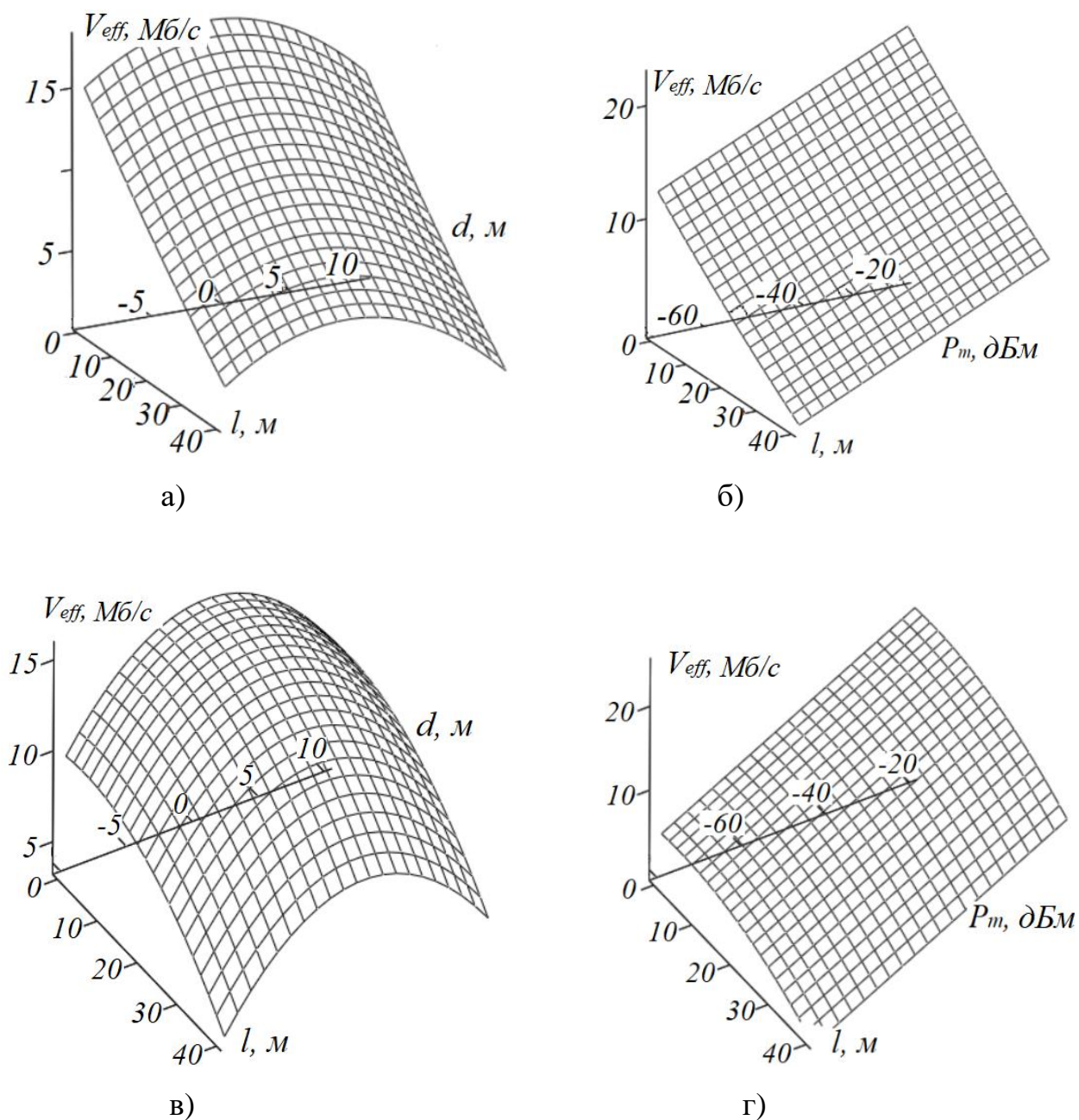


Рис. 4.12. Залежність ефективної швидкості передачі для кутового положення точки доступу від: а – розмірів приміщення в діапазоні 2,4 ГГц; б – від вимірювального значення потужності сигналу в діапазоні 2,4 ГГц; в – розмірів приміщення в діапазоні 5 ГГц; г – від вимірювального значення потужності сигналу в діапазоні 5 ГГц.

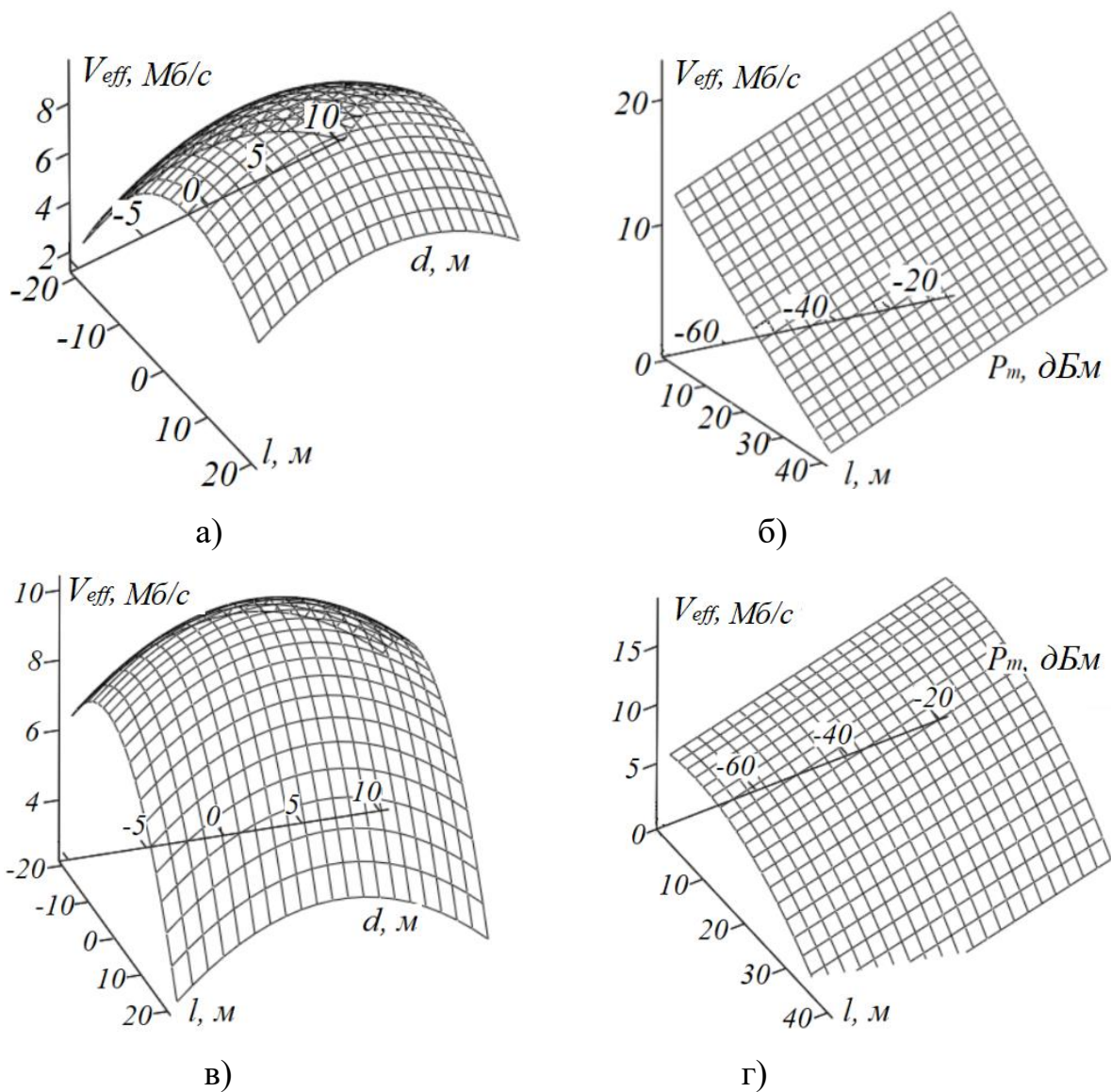


Рис. 4.13. Залежність ефективної швидкості передачі для центрального положення точки доступу від: а – розмірів приміщення в діапазоні 2,4 ГГц; б – від вимірювального значення потужності сигналу в діапазоні 2,4 ГГц; в – розмірів приміщення в діапазоні 5 ГГц; г – від вимірювального значення потужності сигналу в діапазоні 5 ГГц.

Для приміщень, де існує велика кількість відбиваючих поверхонь, а особливо біля стін та кутів, виникають значні флуктуації сигналу. В такому випадку, виникають максимуми та мінімуми просторового розподілу сигналу, до якого більш чутливим є діапазон 5 ГГц. Наведені результати математичних досліджень враховують саме існування мінімумів у просторовому розподілі, що, в певній мірі,

є критичним для мобільних абонентських пристроїв. Для стаціонарних приймальних пристроїв є доцільним їх розташування у максимумах просторового розподілу.

Запропоновані моделі (4.24), (4.25) та (4.26) дозволяють визначати ефективну швидкість передачі інформації у зоні дії максимумів. Для цього, візьмемо результати інтервалів зміни коефіцієнтів затухання сигналу із пп. 2.5. Тоді, для згаданих вище радіоканалів, результати досліджень ефективної швидкості передачі інформації, набудуть вигляду, як показано на рис. 4.14.

Таким чином, при врахуванні максимумів та мінімумів просторового розподілу потужності сигналу, можна отримати відповідні флуктуації ефективної швидкості передачі інформації, які виникають із-за існування значної кількості факторів впливу.

Достовірність оцінювання залежить від коефіцієнтів лінійної регресії та коефіцієнтів затухання сигналу, які визначаються експериментально. Це можна віднести до недоліків моделей, що передбачає виникнення похибки кінцевого результату при зміні геометрії та кількості об'єктів у приміщення. Мінімізувати такий недолік можливо створенням бази даних коефіцієнтів різноманітних факторів впливу та введенням коригуючих коефіцієнтів, збільшення якої буде впливати на підвищення адекватності запропонованих моделей.

Таким чином, на базі функціонального зв'язку між основними параметрами радіоканалу проведено теоретико-експериментальні дослідження статистичного зв'язку, на основі яких отримано нові моделі оцінювання. На основі таких моделей, запропоновано метод оцінювання гарантованої пропускну здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку, для підвищення швидкодії отримання результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування. Суть методу полягає в наступному.

На *першому етапі* за допомогою програмно-апаратних засобів приймального пристрою виконується оцінювання потужності сигналу на вході приймача P_m . Середньостатистичне значення параметру P_m отримується на основі виразу (2.21)

із періодом спостереження від 5 с та циклом моніторингу 1 с. Вимірювання виконується на відстані двох метрів від точки доступу.

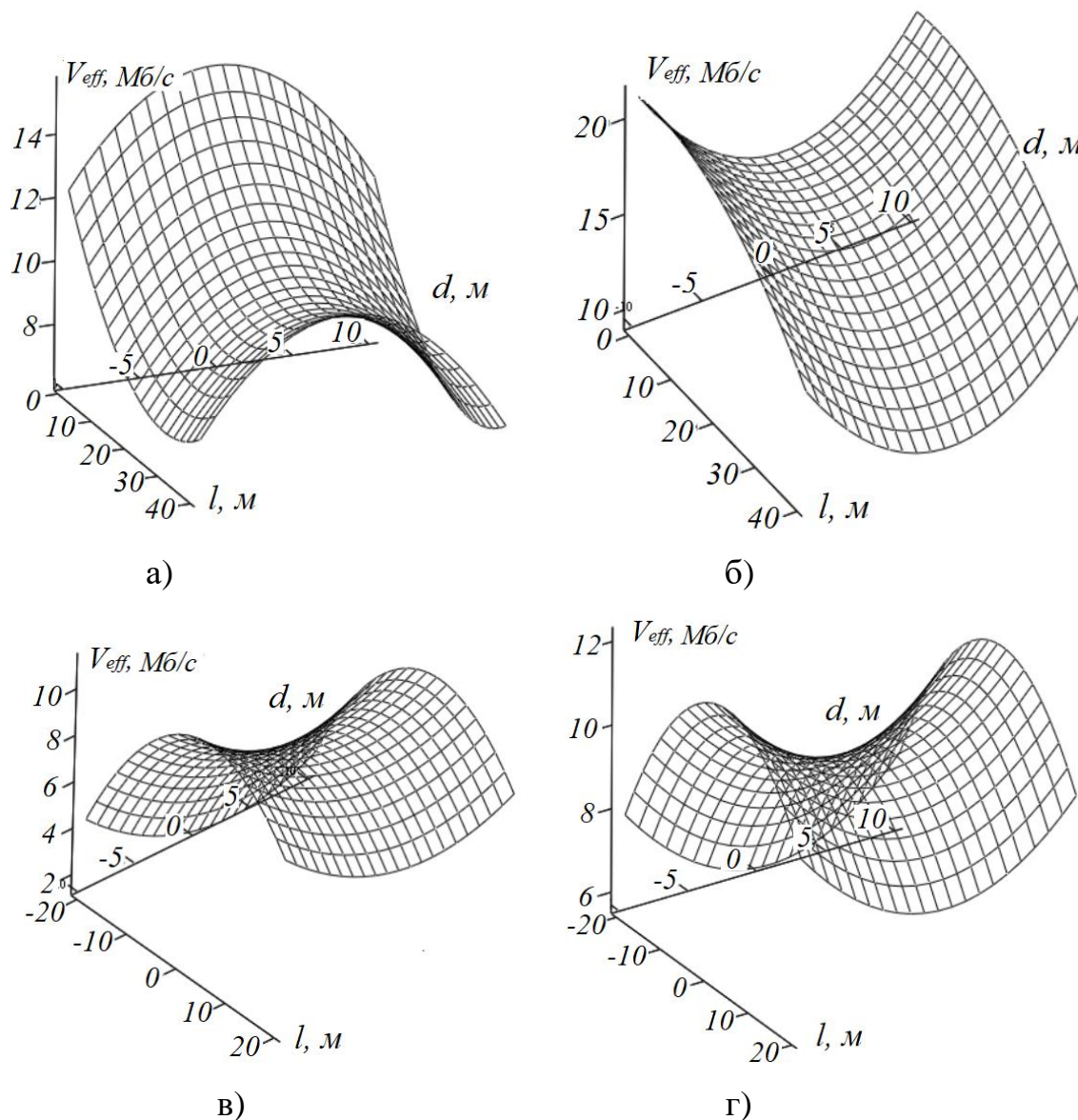


Рис.4.14. Залежність ефективної швидкості передачі максимумів розподілу, для:
 а – кутового положення точки доступу в діапазоні 2,4 ГГц; б – кутового положення точки доступу в діапазоні 5 ГГц; в – центрального положення точки доступу в діапазоні 2,4 ГГц; г – центрального положення точки доступу в діапазоні 5 ГГц

На *другому етапі* розраховується ефективна швидкість передачі інформації у радіоканалі із застосуванням моделі статистичного зв'язку (4.17) та можливі флуктуації біля стін приміщення за допомогою моделі (4.21). При чому,

розрахунок можна виконувати для всіх радіоканалів в межах одного стандарту. Як приклад, за коефіцієнтами у таблиці 4.3 для Wi-Fi.

Розглянемо фрагмент моніторингу, який отримано стаціонарним пристроєм стандарту 802.11n, на рис. 4.15.

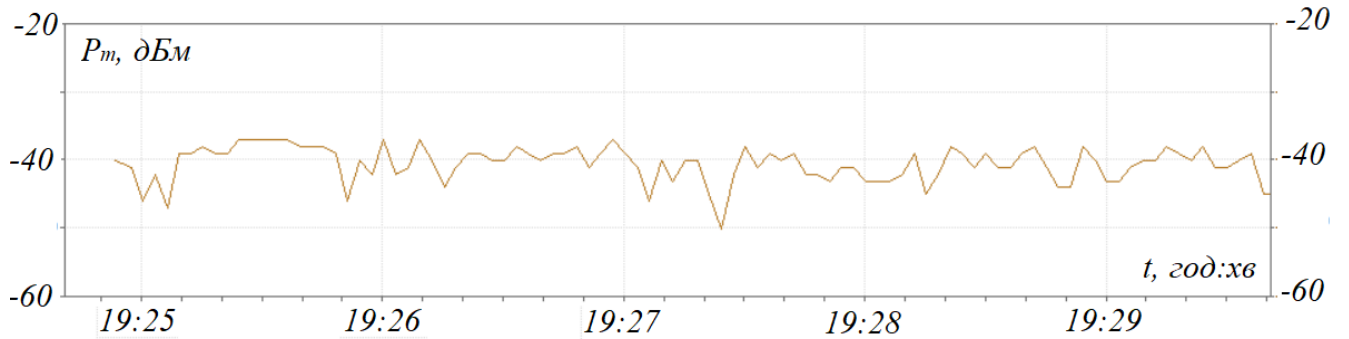


Рис. 4.15. Фрагмент моніторингу потужності сигналу абонентським пристроєм

Розрахунок ефективної швидкості передачі інформації за виразом (4.17) на основі середньостатистичного значення $P_m=42$ дБм для всіх стандартів дасть результати, які показано на рис. 4.16 (нумерація кривих на графіках відповідає пп. 4.2).

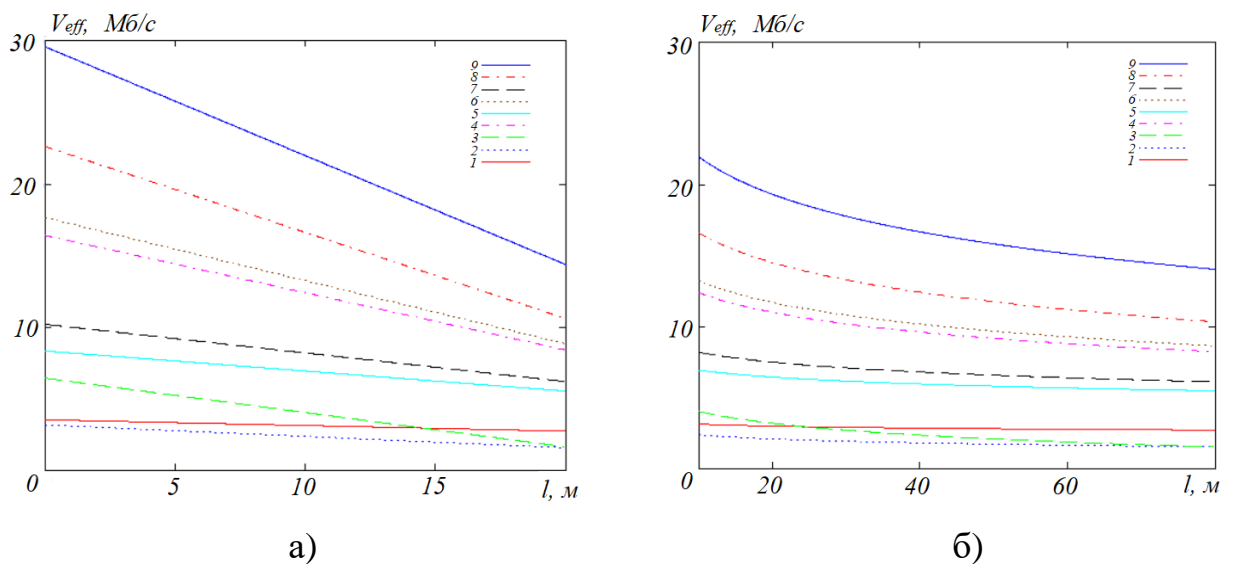


Рис. 4.16. Результати розрахунків за моделлю (4.16): а – для лінійної моделі; б – для логарифмічної

Математичні дослідження моделі (4.20) показують, що похибка оцінювання флуктуацій виникає на рівні $0,01 \dots 0,1$ Мб/с в залежності від стандарту. Тоді, можна врахувати межі флуктуацій ΔP , як зміщення початкових умов регресійної моделі для абонентського пристрою. В результаті цього, отримаємо наступний вираз:

$$V_{eff}(l) \approx K(\pm a_3(l^2 - 4) + a_4(l - 2) + P_m \mp \Delta P) + S_0, \quad (4.27)$$

Якщо врахувати те, що абонентський пристрій знаходиться на початку координат, розрахунок за виразом (4.27) дасть результати, які показано на рис. 4.17 (де умова $l=0$ м відповідає центру приміщення).

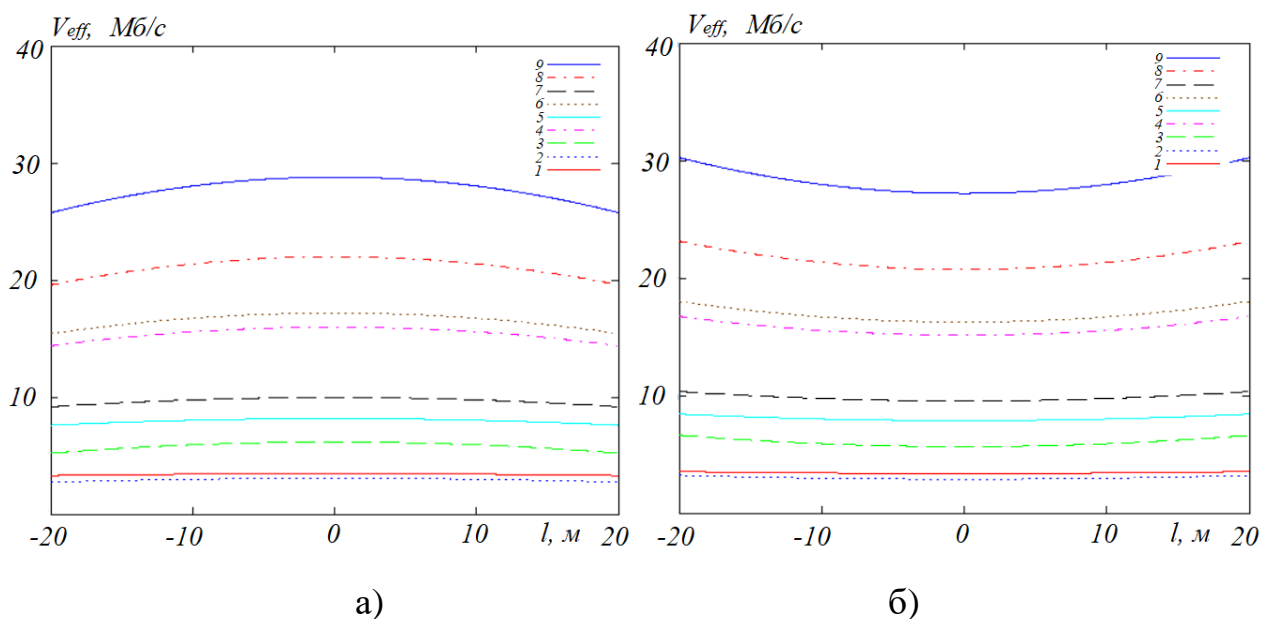


Рис. 4.17. Результати розрахунків за моделлю (4.26): а – для додатного коефіцієнта згасання; б – від’ємного коефіцієнта згасання

Таким чином, враховуючи симетричність коефіцієнта a_3 та задаючи зміщення початку координат коефіцієнтом a_4 можна оцінювати рівень флуктуацій відносно точки доступу або приймального пристрою.

На *третьому етапі* визначаються коефіцієнти інформаційної $K_v(l)$ та енергетичної ефективностей $K_p(l)$ для всіх типів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж в межах відповідного стандарту. Враховуючи вирази (4.6), (4.7) і (4.17), коефіцієнти можна записати так:

$$K_p = \begin{cases} \frac{K(a_1 l + P_m - 2a_1) + S_0}{a_1 l + P_m - 2a_1}, & \text{для } l \leq 16m; \\ \frac{K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 \pm \Delta P) + S_0}{a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2}, & \text{для } l > 16m. \end{cases} \quad (4.28)$$

$$K_v = \begin{cases} \frac{K(a_1 l + P_m - 2a_1) + S_0}{V_{pl}}, & \text{для } l \leq 16m; \\ \frac{K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 \pm \Delta P) + S_0}{V_{pl}}, & \text{для } l > 16m. \end{cases} \quad (4.29)$$

Результати розрахунку за виразами (4.28) та (4.29) наведено на рис. 4.18.

Четвертий етап – виведення результатів оцінювання із врахуванням інтервалів флуктуацій та похибки вимірювання. Враховуючи, що оцінювання ефективної швидкості передачі інформації виконується на основі потужності сигналу на вході приймача та існування флуктуацій параметра P_m , отримаємо наступну нерівність:

$$\left. \begin{array}{l} K(a_1 l + P_m - 2a_1 - \Delta P - \sigma_p) \\ K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 - \Delta P - \sigma_p) \end{array} \right\} + S_0 < V_{eff} \leq \\ \leq S_0 + \begin{cases} K(a_1 l + P_m - 2a_1 + \Delta P + \sigma_p), & \text{для } l \leq 16m; \\ K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2 + \Delta P + \sigma_p), & \text{для } l > 16m. \end{cases} \quad (4.30)$$

або враховуючи відповідність параметрів ΔP і ΔV , які було встановлено експериментально у табл. 4.1, умову (4.30) можна записати так:

$$\left. \begin{aligned} & K(a_1 l + P_m - 2a_1) \\ & K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2) \end{aligned} \right\} + S_0 - \Delta V - \sigma_V < V_{eff} \leq \\
 \leq S_0 + \Delta V + \sigma_V + \begin{cases} K(a_1 l + P_m - 2a_1), & \text{для } l \leq 16 \text{ м;} \\ K(a_2 \ln(l) + P_m - a_2 \ln 2), & \text{для } l > 16 \text{ м.} \end{cases} \quad (4.31)$$

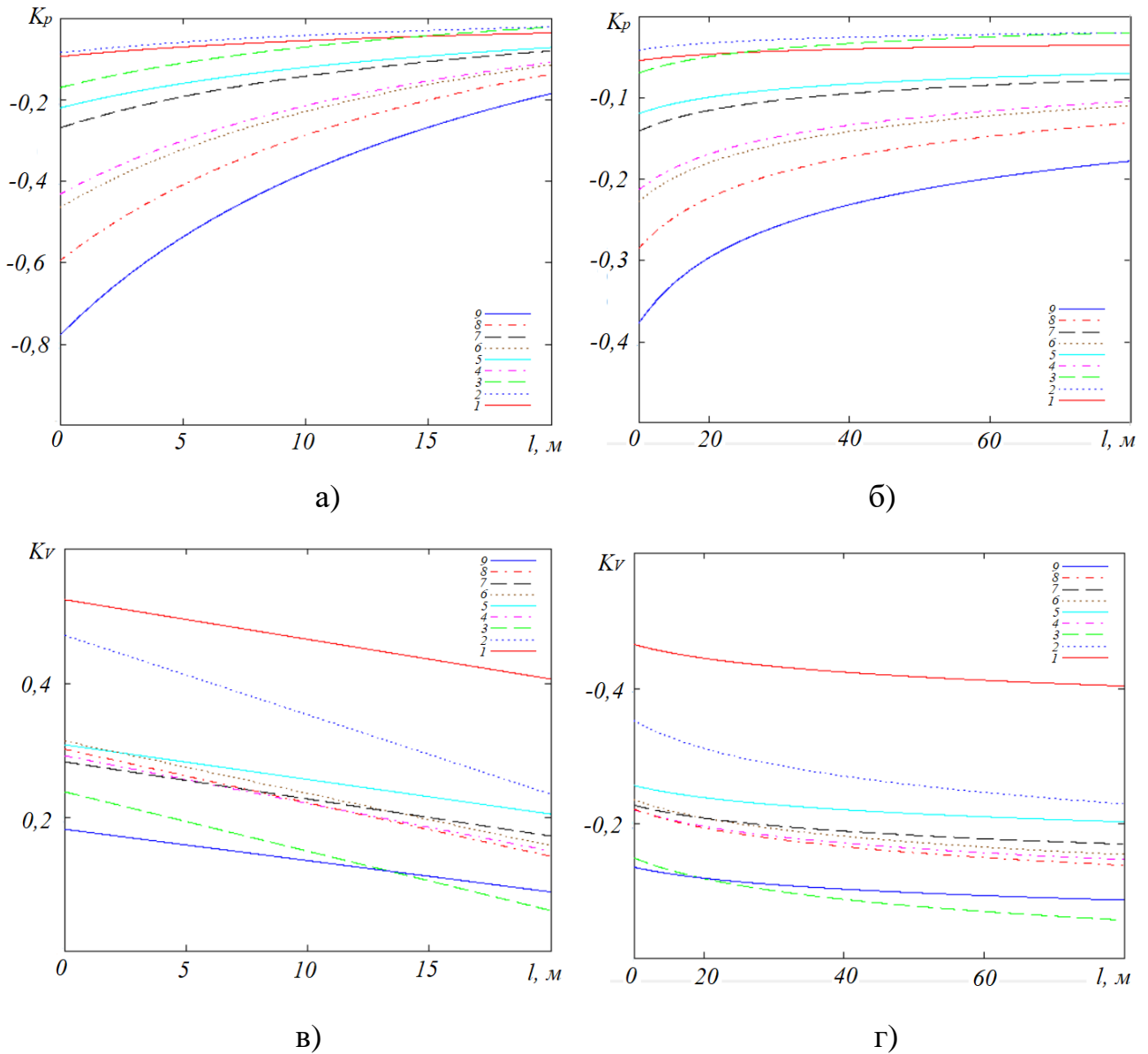


Рис. 4.18. Результати розрахунків коефіцієнтів ефективності радіоканалу: а – енергетичного для $l \leq 16$ м; б – енергетичного для $l > 16$ м; в – інформаційного для $l \leq 16$ м; г – інформаційного для $l > 16$ м

П'ятий етап – встановлення границі гарантованої пропускної здатності радіоканалу для передачі трафіку. Експериментально встановлено [104, 106, 107, 109, 113, 132, 134, 135], що у радіоканалі в умовах приміщень, для забезпечення високої якості інфокомунікаційної послуги (якості обслуговування), бітова швидкість V_b повинна відповідати наступній умові:

$$V_b \leq (0,8..0,7)V_{eff} - \Delta V - \sigma_V. \quad (4.32)$$

Отримана нерівність дає можливість виконувати оцінювання гарантовану пропускну здатність у радіоканалі корпоративних телекомунікаційних мереж, для передачі будь-якого трафіку із бітовою швидкістю V_b .

Для прикладу розглянемо модель (4.24) і (4.25) для кутового та центрального положення ТД та застосування умови (4.31). Оцінювання гарантованої пропускної здатності відеопотоку із частотою 30 к/с для сервісу Youtube із врахуванням бітової швидкості 4k – 56 Мбіт/с та HD – 10 Мбіт/с у просторі приміщення на базі радіоканалу стандарту 802.11n 40 МГц для кутового та центрального положення точки доступу, наведено на рис. 4.19.

Аналогічні розрахунки можна отримати для будь-якого радіоканалу із врахуванням висоти приміщення, наповненості корпоративних приміщень об'єктами, інтервалів флуктуацій та врахуванням флуктуацій біля стін.

Запропонований метод є відносно простим і доступним та базується на вимірюванні основного енергетичного параметра P_m за допомогою програмно-апаратних засобів моніторингу абонентського пристрою. Операції оцінювання параметра P_m можуть бути як для прямої відстані між точкою доступу та приймальним пристроєм, так і з врахуванням просторових розподілів для отримання відповідних результатів для ефективної швидкості передачі інформації у будь-якому корпоративному приміщенні для конкретного абонента із врахуванням всіх діючих факторів впливу.

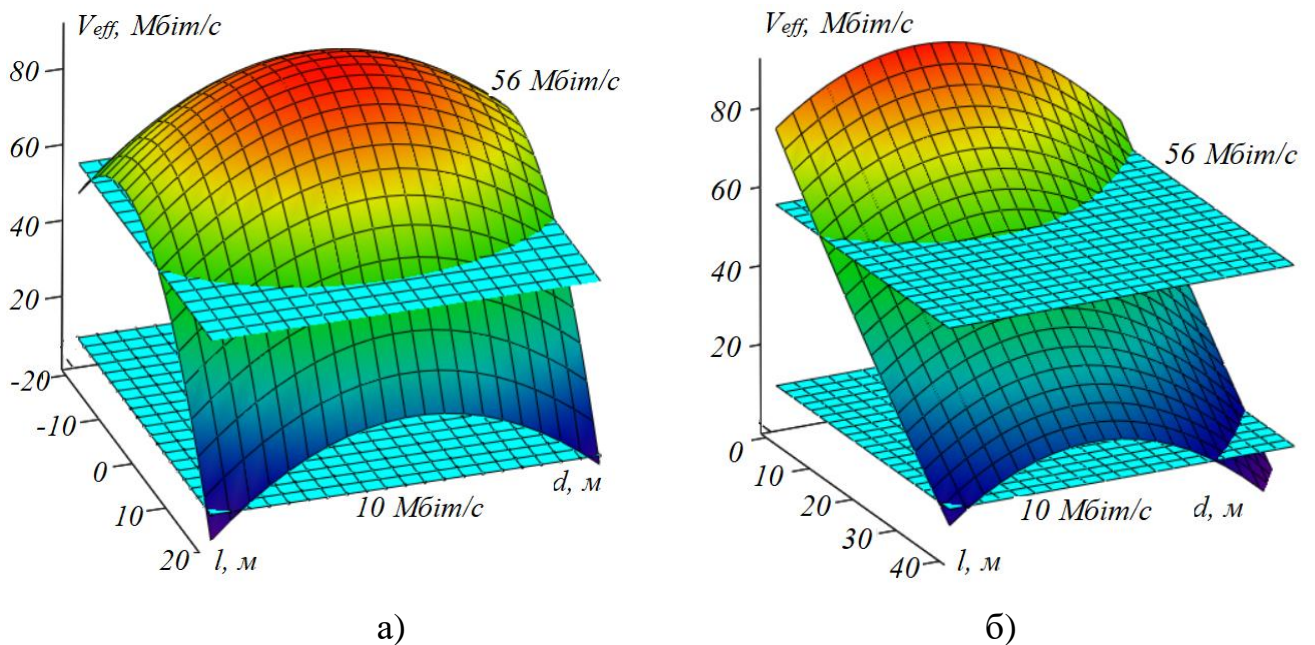


Рис. 4.19. Оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалу в просторі приміщенні для передачі відеотрафіку за умовою (4.31) для: а – кутового положення ТД; б – для центрального положення ТД

Метод характеризується високою швидкістю отримання результатів оцінювання, що дає змогу значно зменшувати час початкової оптимізації корпоративних мереж. Якщо враховувати можливості сучасних абонентських пристроїв для математичних обчислень, то швидкість отримання кінцевого результату буде визначатись часом вимірювання середньостатистичного параметра потужності сигналу на вході приймача.

Достовірність запропонованого методу залежить від трьох основних факторів:

- достовірності результатів, на основі яких отримана математична модель (враховуючи довірчу ймовірність 0,99, довірчий інтервал вимірювальних параметрів складе: $\sigma_P \pm 0,25$ дБм; $\sigma_V \pm 0,03$ Мб/с);

- достовірності вимірювання параметра P_m , що буде залежати від характеристик приймального обладнання у різних виробників;

– достовірності оцінювання інтервалів ΔP і ΔV , для врахування факторів впливу.

В загальному, найбільшою проблемою буде достовірність вимірювання параметра P_m , але таку достовірність можна підвищувати створенням бази даних параметрів моделі статистичного зв'язку $V_{eff}(P_{Rx})$ для різних пристроїв. Крім того, саме знаходження статистичних зв'язків, коригуючих коефіцієнтів між основними параметрами радіоканалу та певним типом фактору впливу, із застосуванням інтервалів флуктуацій, дасть можливість підвищити точність оцінювання.

Для достовірності 0,95 період спостереження складе 20 с із похибкою до $\sigma_P \pm 0,5$ дБм та $\sigma_V \pm 0,06$ Мб/с, а для 5 с – до $\sigma_P \pm 1$ дБм та $\sigma_V \pm 0,1$ Мб/с, що в загальному дасть похибку не більше 5% для високопродуктивних радіоканалів, що є меншим ніж середньостатистичні значення інтервалів флуктуацій для прямої видимості.

Як обмеження у застосуванні запропонованого методу, можна виділити існування значної кількості факторів впливу, особливо інтерференційних завад. Збільшення кількості інтерференційних завад призведе до збільшення похибки оцінювання, оскільки такі завади зміщують характеристики радіоканалу до моделі логарифмічного характеру. Запропонований метод об'єднує операції оцінювання параметра P_m , оцінювання ефективності радіоканалу по всій довжині та можливий вплив факторів впливу.

Висновки до розділу 4

У розділі, на основі теоретичних та експериментальних досліджень, запропоновано новий метод оцінювання гарантованої пропускнуої здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку на базі статистичних зв'язків основних параметрів радіоканалу для етапів проектування.

В результаті проведених досліджень отримано наступні наукові та практичні результати.

1. Отримано математичні співвідношення на базі коефіцієнтів енергетичної та інформаційної ефективності, які показують функціональний зв'язок між потужністю сигналу на вході приймача, пропускнуою здатністю та ефективною швидкістю передачі інформації і показують можливість використання статистичного зв'язку між основними параметрами радіоканалу.

2. Проведено експериментальні дослідження основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на базі стандарту Wi-Fi з метою встановлення статистичного зв'язку. Встановлено, що рівень затухання та флуктуацій сигналу є подібним для всіх досліджуваних стандартів, і розподіл потужності сигналу по всій довжині радіоканалу можна передбачити для будь-якого приймального пристрою, на основі вимірювання в одній точці приміщення. Підтверджено, що для зменшення інформаційних втрат та підвищення ефективності передачі інформації на великі відстані, кращими є радіоканали із меншою смугою частотного каналу.

3. Запропоновано модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на основі квадратичної функції, що дає змогу враховувати ефект багатопроменевого поширення хвиль, що є основною причиною виникнення міжсимвольної інтерференції у корпоративних приміщеннях. На основі теоретико-експериментальних досліджень встановлено, що на основі максимумів та мінімумів просторового розподілу потужності сигналу у приміщенні, можна отримати відповідні флуктуації ефективної швидкості передачі інформації, які виникають із-за існування значної кількості факторів впливу.

4. Вперше запропоновано метод оцінювання гарантованої пропускнуої здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку, який використовує статистичний зв'язок між параметрами радіоканалу, що дало змогу збільшити швидкодію обробки результатів під час

початкової оптимізації мережі на етапах проектування. Метод дає змогу підвищити швидкість отримання кінцевого результату до 5 с із достовірністю 0,95 і похибкою оцінювання до 1 дБм та 1 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для мінімальної дії факторів впливу у приміщенні.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ У РАДІОКАНАЛАХ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

5.1 Розроблення узагальнених інтегральних показників факторів впливу у радіоканалах

В попередніх розділах розроблено моделі оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на базі експериментальних досліджень, які в загальному можна описати за допомогою рівнянь (4.3) та використовувати для стандартів Wi-Fi і 5G. Зв'язок між такими параметрами визначається на основі енергетичного та інформаційного коефіцієнтів ефективності за виразами (4.1) і (4.2). Дію факторів впливу враховують регресійні функції $f_V(l)$, $f_{VPI}(l)$ і $f_P(l)$ для кожного параметра окремо, а функції f_I і f_2 – в комплексі. Такі функції враховують сумарну дію всіх факторів впливу у радіоканалі і не враховуються дію окремо існуючих, що обмежує використання розроблених моделей та методів оцінювання. З метою, розширення можливостей початкової оптимізації, запропоновано враховувати дію певного типу фактору впливу на параметри радіоканалів. Це вирішено шляхом розроблення інтегральних показників факторів впливу у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж.

Для вирішення поставленого завдання, встановлено математичний зв'язок між факторами впливу та основними параметрами радіоканалу. Для цього запропоновано узагальнену модель оцінювання потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням факторів впливу на базі отриманих експериментальних моделей у попередніх розділах.

Враховуючи визначення початкових значень на основі виразів (2,23), початкові значення потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації можна записати так:

$$P_0 \approx P_m - f_P(2), \quad (5.1)$$

$$V_0 \approx V_m - f_V(2), \quad (5.2)$$

де $f_P(2)$ і $f_V(2)$ – функції зв'язку початкових значень із параметрами вимірювання P_m і V_m відповідно.

Враховуючи моделі оцінювання просторового розподілу сигналу у приміщенні, які розроблені у розділах 2 і 3, загальні вирази оцінювання основних параметрів радіоканалу можна записати так:

$$P_{Rx} \approx f_P(l, d) + P_m - f_P(2), \quad (5.3)$$

$$V_{eff} \approx f_V(l, d) + P_m - f_V(2), \quad (5.4)$$

де $f_P(l, d)$ і $f_V(l, d)$ – функції просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі для інформації у приміщенні відповідно.

Вимірювальні значення отримуються за допомогою програмно-апаратних засобів моніторингу абонентського пристрою на основі виразів (2.20) і (3.29). В загальному, процес вимірювання потужності сигналу на вході приймача можна вважати, як такий, що враховує всі енергетичні фактори впливу. Тоді, на основі моделі побудови радіоканалу (2.2), цикл моніторингу можна записати так:

$$P_m \approx \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{P_{Tx}(t) - \sum_{j=1}^m P_{e,j}(t)}{L(t)} \right) dt, \quad (5.5)$$

де P_{Tx} – потужність сигналу випромінювання передавача; L – затухання сигналу у середовищі передачі; P_e – рівень потужності енергетичного фактору впливу; m – кількість існуючих факторів впливу у радіоканалі.

Враховуючи період спостереження та дискретний час моніторингу, вираз (5.5) можна записати так:

$$P_m \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{Tx,i} - \left(\sum_{j=1}^m P_{e,j} \right)_i}{L_i} \right), \quad (5.6)$$

де n – кількість циклів моніторингу у періоді спостереження.

Вираз (5.6) враховує m існуючих енергетичних факторів впливу, які діють на кінцевий результат при оцінюванні потужності сигналу на вході приймача.

Аналогічно можна отримати загальний вираз для вимірювального значення ефективною швидкості передачі інформації V_m , але тут кожен фактор впливу збільшує кількість службової інформації у радіоканалі. Тоді, врахування інформаційних факторів впливу можна записати так:

$$V_m \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(V_{m,i} - \sum_{i=1}^s V_{i,i} \right), \quad (5.7)$$

де V_i – швидкість передачі інформації, що витрачається на інформаційний фактор впливу; s – кількість інформаційних факторів впливу.

Для відомих факторів впливу, оцінювання основних параметрів радіоканалу можна виконувати на основі наступних виразів із врахуванням інтегральних показників впливу:

$$P_{Rx} \approx (f_P(l, d) + P_m - f_P(2)) K_P^e, \quad (5.8)$$

$$V_{eff} \approx (f_V(l, d) + V_m - f_V(2)) K_V^i. \quad (5.9)$$

де K_P^e , K_V^i – інтегральні показники впливу енергетичних та інформаційних факторів відповідно.

Інтегральні показники впливу енергетичних та інформаційних факторів враховують дію всіх факторів впливу у радіоканалі. Тоді, складові інтегральних показників впливу визначають дію кожного окремо фактору впливу. Такі складові можна визначити на основі еталонних моделей, що оцінюють середньостатистичні значення, та моделей що враховують дію факторів впливу. Враховуючи вирази (4.4), (4.3), (4.6) і (4.7) складові інтегральних показників впливу енергетичних та інформаційних факторів можна записати так:

$$K_{P,i}^e \approx \frac{f_P(l,d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{Tx,i} - \left(\sum_{j=1}^m P_{e,j} \right)_i}{L_i} \right) - f_P(2)}{f_P(l,d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{Tx,i}}{L_i} \right) - f_P(2)}, \quad (5.10)$$

$$K_{V,i}^i \approx \frac{f_V(l,d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(V_{m,i} - \sum_{i=1}^s V_{i,i} \right) - f_V(2)}{f_V(l,d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m,i} - f_V(2)}. \quad (5.11)$$

де i – i -й показник впливу.

Тоді, загальні вирази інтегральних показників впливу енергетичних та інформаційних факторів запишуться наступним чином:

$$K_P^e \approx \sum_{k=1}^v \varphi_k \left(\frac{f_P(l,d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{Tx,i} - \left(\sum_{j=1}^m P_{e,j} \right)_i}{L_i} \right) - f_P(l_0)}{f_P(l,d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{Tx,i}}{L_i} \right) - f_P(l_0)} \right)_k, \quad (5.12)$$

$$K_V^i \approx \sum_{z=1}^c \rho_z \left(\frac{f_V(l,d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(V_{m,i} - \sum_{i=1}^s V_{i,i} \right) - f_V(l_0)}{f_V(l,d) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m,i} - f_V(l_0)} \right)_z. \quad (5.13)$$

де ν – кількість енергетичних показників впливу; c – кількість інформаційних показників впливу; φ_k і ρ_z – вагові коефіцієнти факторів впливу.

З точки зору абонентського приймального пристрою, оцінювання отриманих інтегральних показників впливу є досить складним і затратним по часу, особливо для інформаційних факторів. Виходом із такої ситуації є створення бази даних результатів оцінювання окремих факторів впливу на основі експериментальних досліджень та регресійного аналізу.

Враховуючи взаємозв'язок основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, фактор впливу який має значну дію на рівень сигналу також впливає на ефективну швидкість передачі інформації. Це впливає із коефіцієнтів енергетичної та інформаційної ефективності радіоканалу. Враховуючи вирази (4.1) і (4.2), та підставляючи в них (5.12) і (5.13), отримаємо:

$$K_P = \frac{f_V(l,d) + V_m - f_V(2)}{f_P(l,d) + P_m - f_P(2)} \cdot \frac{K_V^i}{K_P^i}, \quad (5.14)$$

$$K_V = \frac{f_V(l,d) + V_m - f_V(2)}{V_{pl}} \cdot K_P^i. \quad (5.15)$$

Існування двох параметрів потребує значного періоду спостереження, що знижує швидкодію отримання результатів оцінювання. Значно підвищити швидкодію можна на основі моделі статистичного зв'язку (4.16). Тоді, модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації можна записати так:

$$V_{eff}(P_{Rx}) \approx K \left(f_P(l,d) + P_m - f_P(2) \right) K_P^i + S_0, \quad (5.16)$$

а коефіцієнт інформаційної ефективності:

$$K_V = \frac{K(f_P(l, d) + P_m - f_P(2))K_P^i + S_0}{V_{pl}}. \quad (5.17)$$

Запропоновані вирази (5.12) і (5.13) є узагальненими інтегральними показниками факторів впливу у радіоканалах, які використовують еталонні моделі середньостатистичних значень в межах покриття мереж радіодоступу, що дало можливість прогнозувати дію кожного окремого фактору на характеристики радіоканалу. Використання таких показників у виразах (5.8), (5.9) і (5.16) дають змогу розширити можливості розроблених методів та моделей оцінювання параметрів і енергетичної та інформаційної ефективності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування.

Достовірність оцінювання за такими моделями залежить від рівня адекватності еталонних моделей оцінювання основних параметрів, яка буде збільшуватись при розширенні бази даних експериментальних досліджень, як для існуючих стандартів побудови радіоканалів, так і для майбутніх модифікацій.

5.2 Дослідження впливу інтерференційних завад на параметри радіоканалу

В загальному випадку, *інтерференція* це поява на антені приймача як хвилі прямої видимості від передавача, так і хвиль відбитих від перешкод зі зміщеними фазами [271]. Але для мереж 5G/Wi-Fi інтерференційні завади можна розділити на дві групи [272–275]: завади створюванні іншими передавачами цього ж стандарту (враховуючи завади від користувачів мережі та технології MIMO) та завади приймачів інших стандартів і побутових приладів (як правило, їх відносять до шумів). Оскільки, шумові та інтерференційні завади діють у радіоканалі одночасно, то, в загальному, рівень сигнал/шум у радіоканалі складе:

$$E / N = \frac{P_{RX}}{P_u + P_i}, \quad (5.18)$$

де P_u і P_i – потужність шумових та інтерференційних завад відповідно.

Тоді вираз (1.4) можна записати так:

$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{S}{P_u + P_i} |L^2| \right). \quad (5.19)$$

Інтерференційні завади можна також можна поділити на вузькосмугові та широкосмугові [276]. При існуванні в середовищі передачі вузькосмугових інтерференційних завад, енергетична ефективність сигналу збільшується при використанні методів розширення спектру радіоканалів. Також, це дає високу завадостійкість від інших радіозавад із вузькою смугою. Інша ситуація виникає при існуванні широкосмугових завад. Потужність таких завад збільшується пропорційно смузі частот сигналу. Тому, в такому випадку, до таких завад можна віднести системи передачі інших стандартів із широкосмуговими частотними каналами, а також завади, які використовують методи розширення спектру. Такі завади будуть вносити найбільший вплив на ефективність передавання інформації у радіоканалах.

Згідно виразів (5.8) і (5.9), для визначення коефіцієнтів впливу інтерференційних завад необхідно отримати експериментальні залежності параметрів радіоканалу для двох випадків: пряма видимість без завад та існування в радіоканалі інтерференційних завад. Частково такі завади досліджувались у попередніх розділах разом з іншими завадами. В даному випадку, проведемо оцінювання з точки зору складових інтегральних показників.

Для проведення експериментальних досліджень було побудовано мережу радіодоступу стандарту Wi-Fi, схема якої наведена на рис. 5.1.

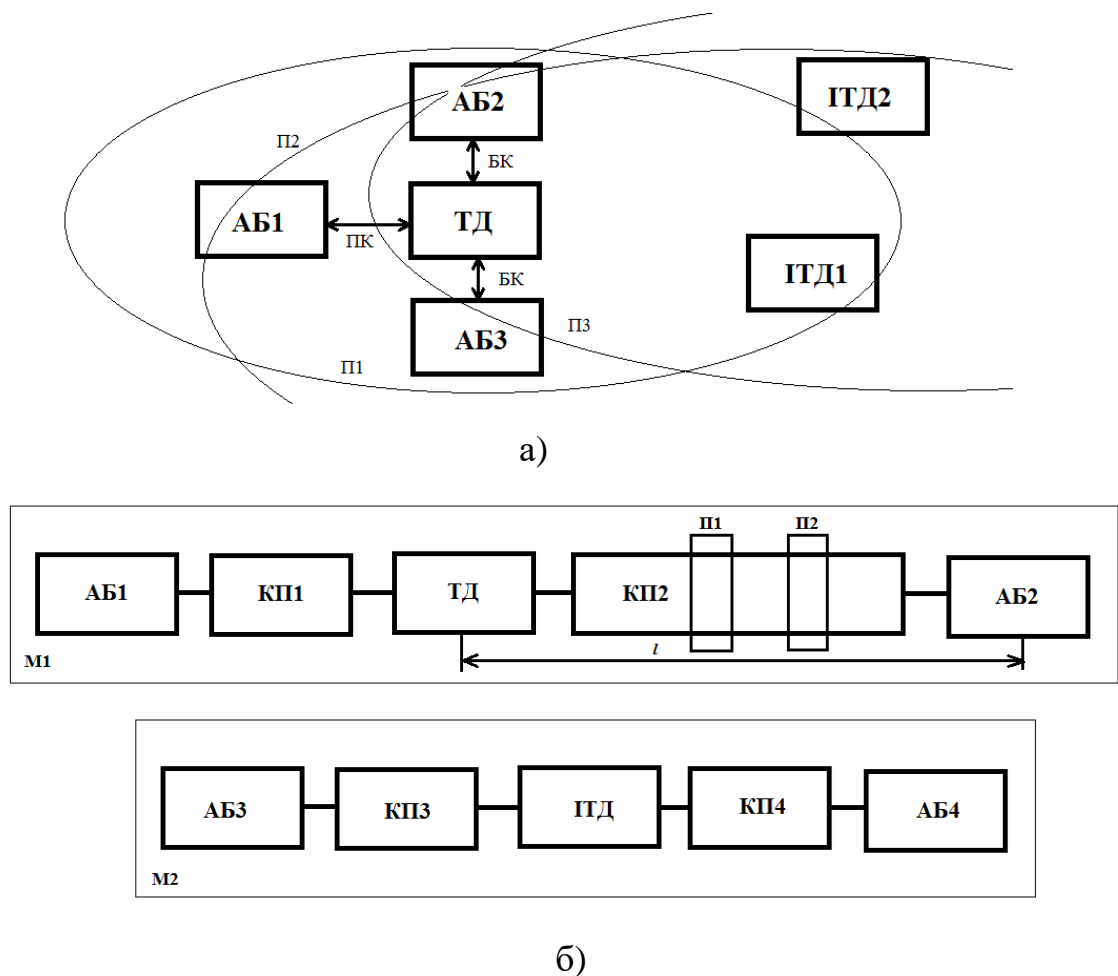


Рис. 5.1. Схема досліджуваної мережі (а) та радіоканалу із інтерференційними завадами (б)

Мережа (М1) створено на основі точки доступу (ТД) із двома активними абонентськими пристроями: АБ1 і АБ2. Між абонентами і ТД існують радіоканали КП1 і КП2, при чому АБ2 є рухомим по всій довжині радіоканалу l , а КП1 змінним, як проводовим так і радіоканалом, для оцінювання напівдуплексного режиму, на основі збільшення активних абонентських пристроїв. Додатково у КП2 вносились дві перешкоди П1 і П2 на відстані 5,5 м та 8,5 м від ТД, для визначення впливу архітектурних конструкцій. За існування інтерференційної завади відповідала сусідня мережа (М2) на основі точки доступу ІТД, де існували активні абоненти АБ3 та АБ4. Для досліджень було обрано частотний діапазон 2,4 ГГц, який є сильно завантажений на даний час.

Було використано два випадки: сумісний частотний канал де центральна частота ТД і ІТД співпадають; сусідній частотний канал, де перетинаються бічні пелюстки спектра ТД та ІТД [112]. Приклад частотних спектрів, що отримані на основі програмно-апаратних засобів моніторингу наведено на рис. 5.2.

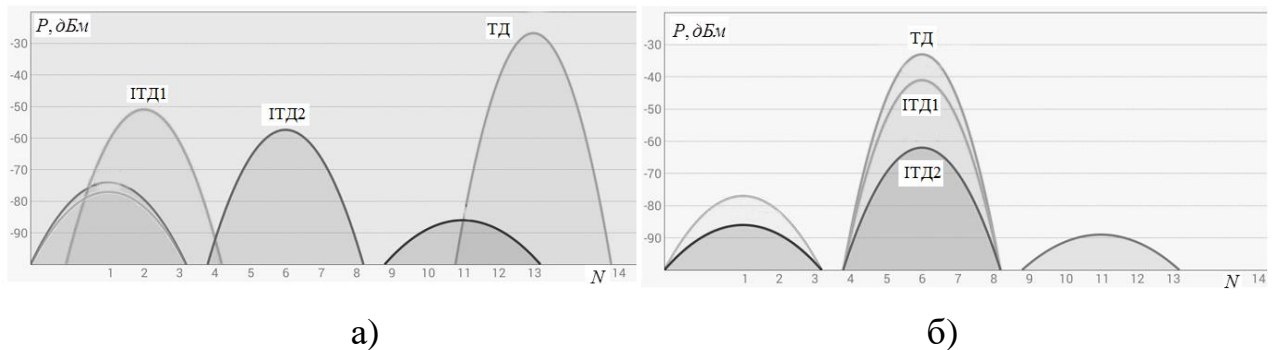


Рис. 5.2. Частотний спектр для сусідніх (а) та суміщених частотних каналів (б)

На рис. 5.2 показані частотні спектри для радіоканалів шириною 20 МГц. Аналогічні спектри можна отримати для радіоканалів у 40 МГц, 80 МГц та 160 МГц. Стандарт Wi-Fi використовує неліцензійні частотні діапазони 2,4 ГГц та 5 ГГц, тому кількість можливих частотних каналів без відсутності завад є обмеженими. Тому, в більшості випадків, при побудові корпоративних телекомунікаційних мереж будуть існувати інтерференційні завади при сусідніх та суміщених частотних каналах. Сумісне функціонування мереж забезпечується за рахунок ведення затримок на передачу пакетів для пристроїв відповідної мережі та подальшої передачі при звільненні частотного ресурсу. На практиці, значний вплив такого виду інтерференційних завад, виникає при умові збільшення навантаження у корпоративних мережах при передаванні великих об'ємів інформації [112]. Але, як показують дослідження у [109], існує незначний вплив навіть для режиму очікування інтерференційних точок доступу, оскільки передається службова інформація та передача пакетів в режимі багатоспрямованої передачі.

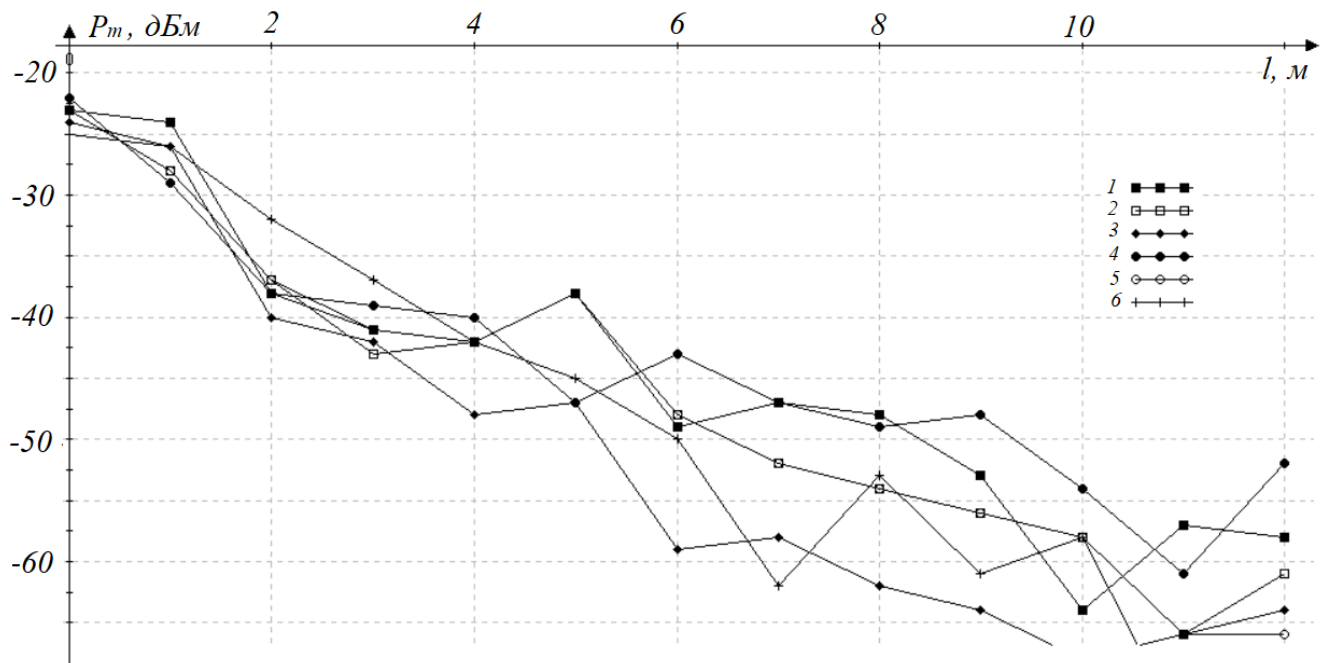
Основними параметрами для досліджень обрано ефективну швидкість передачі інформації V_m і потужність сигналу на вході приймача P_m , та вирази для вимірювання з використанням періоду спостереження (2.20) і (3.29), а також довжина радіоканалу l .

Дослідження проведено для радіоканалу стандарту 802.11n із смугами частотних каналів 20 МГц та 40 МГц. Архітектурні перешкоди являли собою конструкції із дерева, як перший тип, та цегли як другий. Для аналізу результатів досліджень було введено наступні види позначень на графіках: крива 1 – радіоканал зі смугою 20 МГц без архітектурних перешкод; крива 2 – радіоканал зі смугою 20 МГц і перешкоди першого типу; крива 3 – радіоканал зі смугою 20 МГц і перешкоди другого типу; крива 4 – радіоканал зі смугою 40 МГц без архітектурних перешкод; крива 5 – радіоканал зі смугою 40 МГц і перешкоди першого типу; крива 6 – радіоканал зі смугою 40 МГц і перешкоди другого типу [112].

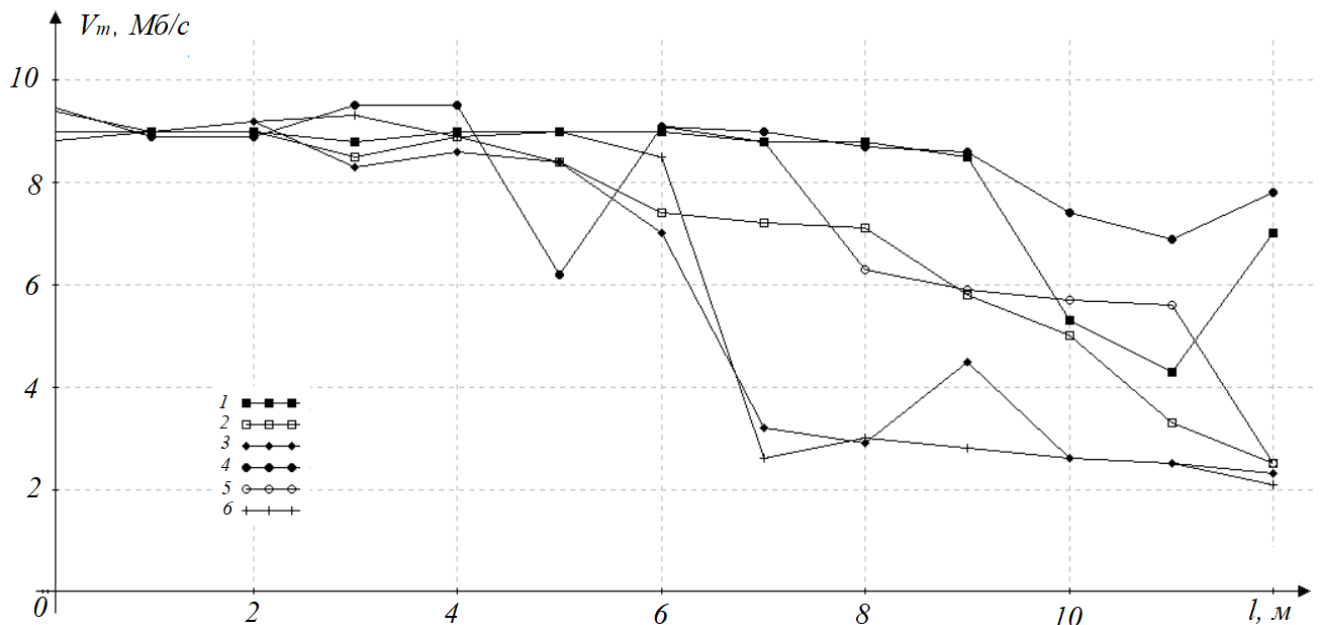
В першу чергу, розглянемо залежності розподілу потужності сигналу на вході приймача АБ2 та ефективної швидкості передачі інформації при відсутності інтерференційних завад у радіоканалі для схеми: проводовий КП1 та радіоканал КП2. Результати досліджень наведено на рис. 5.3.

Як видно із результатів досліджень на рис. 5.5 а, спостерігається типова картина майже лінійного затухання сигналу для коротких радіоканалів. Для параметра ефективної швидкості передачі інформації існує обмеження у внутрішній шині пристроїв, оскільки до 4 м для частотних каналів із смугою 20 МГц та 40 МГц отримані однакові результати. Але для загального вивчення та оцінювання коефіцієнтів впливу інтерференційних завад це є несуттєвим, оскільки ІТД зазвичай знаходиться на більших відстанях. Тоді, можна вважати, що, для такої побудови, максимальна ефективна швидкість передачі інформації становить 9,6 Мб/с. Перешкода першого типу зменшує ефективну швидкість передачі інформації, в середньому на 3 Мб/с, а перешкода другого – на 6 Мб/с, за рахунок більшої густини матеріалу. Використання розширеного частотного

каналу 40 МГц дає аналогічний результат, як і радіоканал із смугою 20 МГц при існуванні архітектурних перешкод обох типів.



а)



б)

Рис. 5.3. Залежність потужності сигналу на вході приймача (а) та ефективної швидкості передачі інформації (б) від довжини радіоканалу без завад

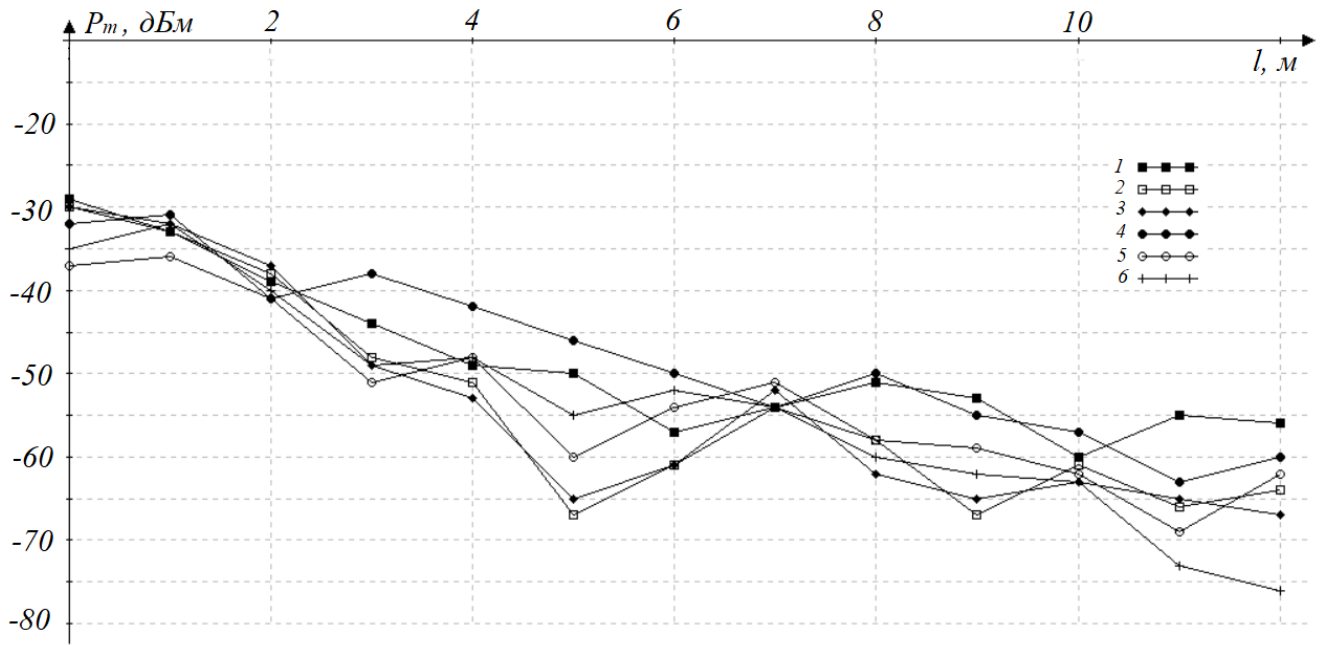
Далі дослідимо випадок максимального завантаження радіоканалу для ТД та ІТД, при існуванні сумісного інтерференційного каналу. Для цього було задіяно схему, що забезпечувала існування одного радіоканалу для кожної точки доступу (два пристрої): КП1, КП3 – проводові; КП2, КП4 – радіоканали. Також, для така схема була досліджена при існуванні трьох радіоканалів для ТД (КП1, КП2, КП4 – радіоканали, КП3 – проводовий). Результати експериментальних досліджень для двох схем наведено на рис. 5.4 та рис. 5.5 відповідно.

Аналіз отриманих результатів на рис. 5.4 і 5.5 показує, що існування інтерференційних завад може зменшувати рівень параметра потужності сигналу на вході приймача приблизно на 10 дБм при суміщеному та до 5 дБм при сусідньому частотних каналах. Рівень флуктуацій є сталим для обох випадків. Тоді, можна стверджувати, що фактор впливу інтерференційних завад не залежить від інтервалу флуктуацій потужності сигналу на вході приймача. Параметр ефективної швидкості передачі інформації є більш чутливим до існування ІТД, особливо при збільшенні кількості активних пристроїв у мережі. Результати насамперед показують ефективність технології боротьби за частотний ресурс.

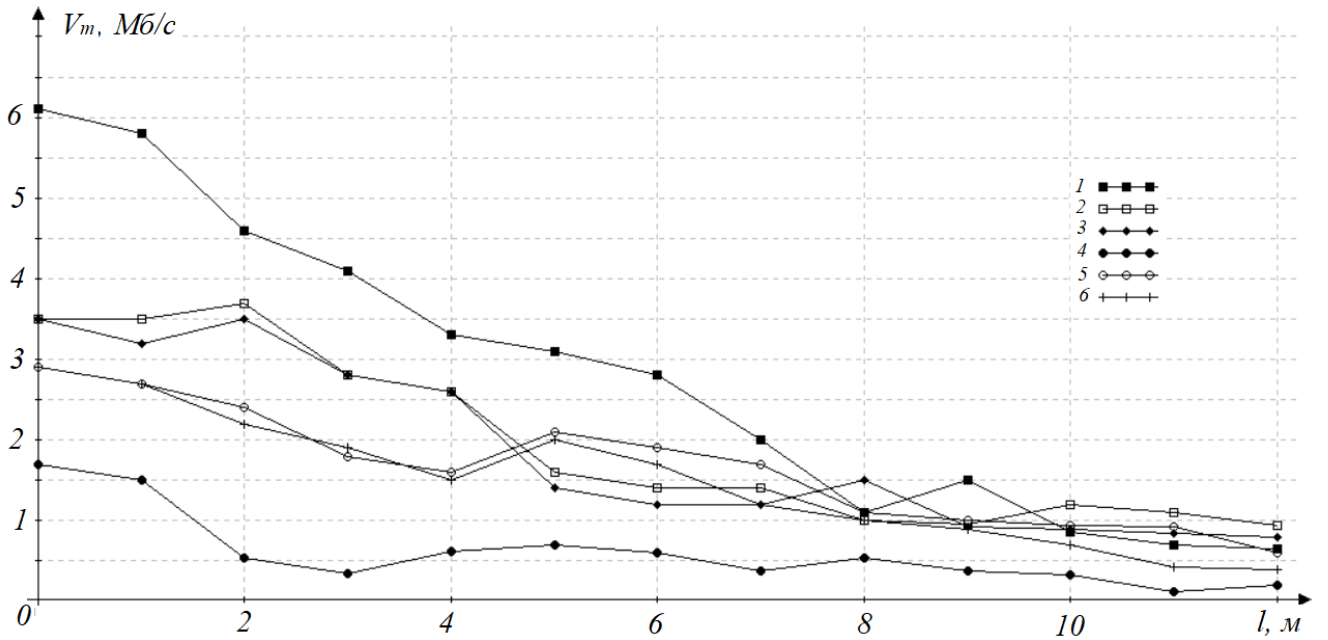
Для суміщеного частотного каналу (існування двох абонентів у мережі) розкид параметрів для різних режимів передавання даних є суттєвим (див. рис. 5.4). Вплив типу архітектурних перешкод є мінімальним, що можна пояснити перемиканням пристроїв із профіля КАМ модуляції до профілю із ФМ модуляцію, яка є менш критичною до відношення сигнал/шум.

При збільшенні кількості пристроїв у мережі (див. рис. 5.5), ефективна швидкість передачі інформації значно зменшується за рахунок обмеженого фізичного ресурсу суміщеного частотного каналу, що робить досліджувану мережу непридатною для передачі великих об'ємів трафіку.

Додатково, встановлено, що в умовах суміщеного частотного каналу, ефективність розширення спектра до 40 МГц у два рази менша ніж для смуги 20 МГц.

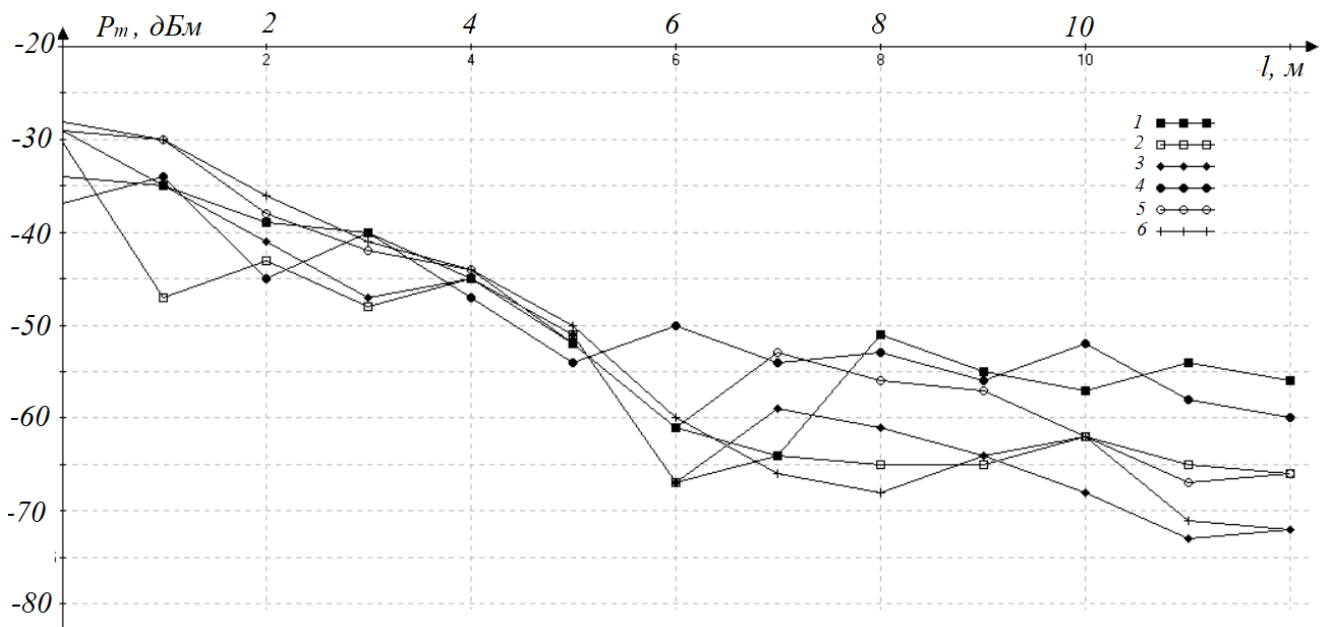


a)

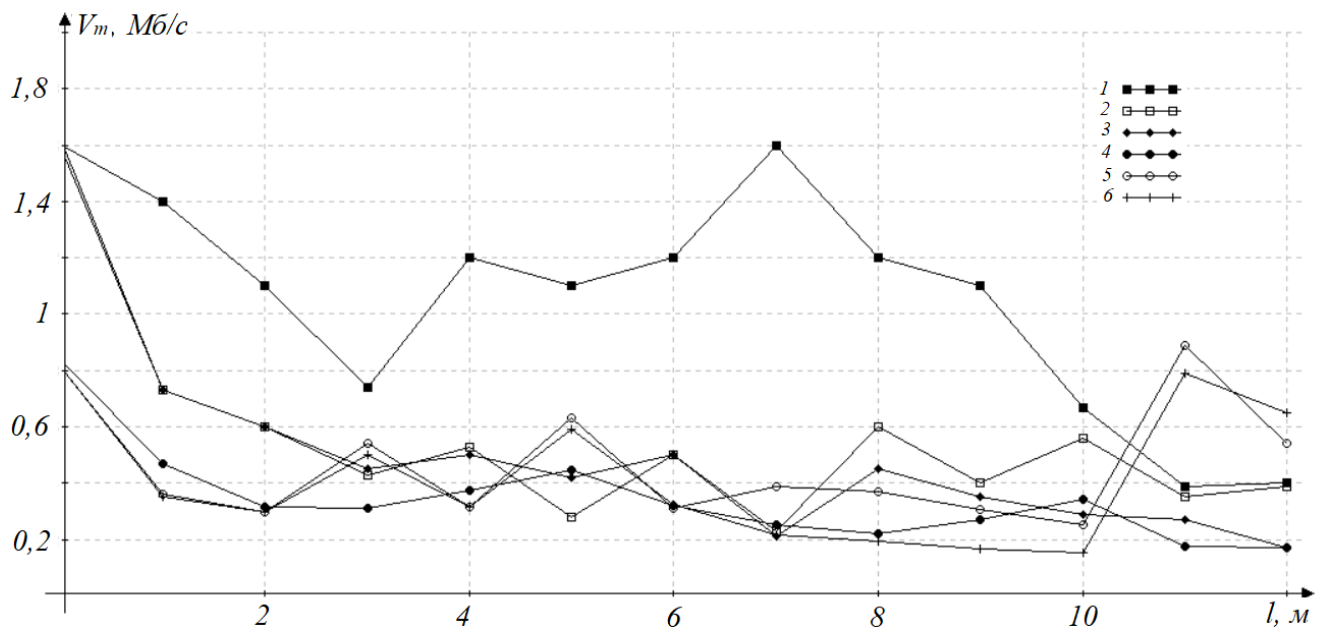


б)

Рис. 5.4. Залежність потужності сигналу на вході приймача (а) та ефективної швидкості передачі інформації (б) при існуванні сумісного частотного каналу для двох абонентських пристроїв



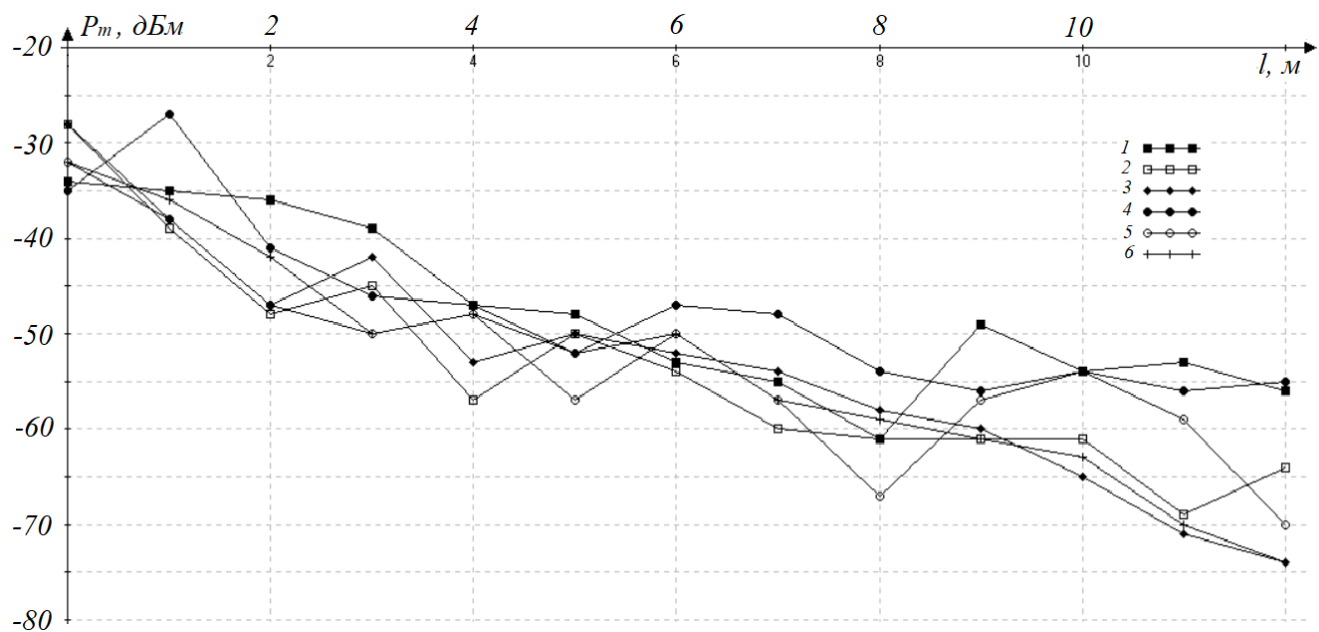
а)



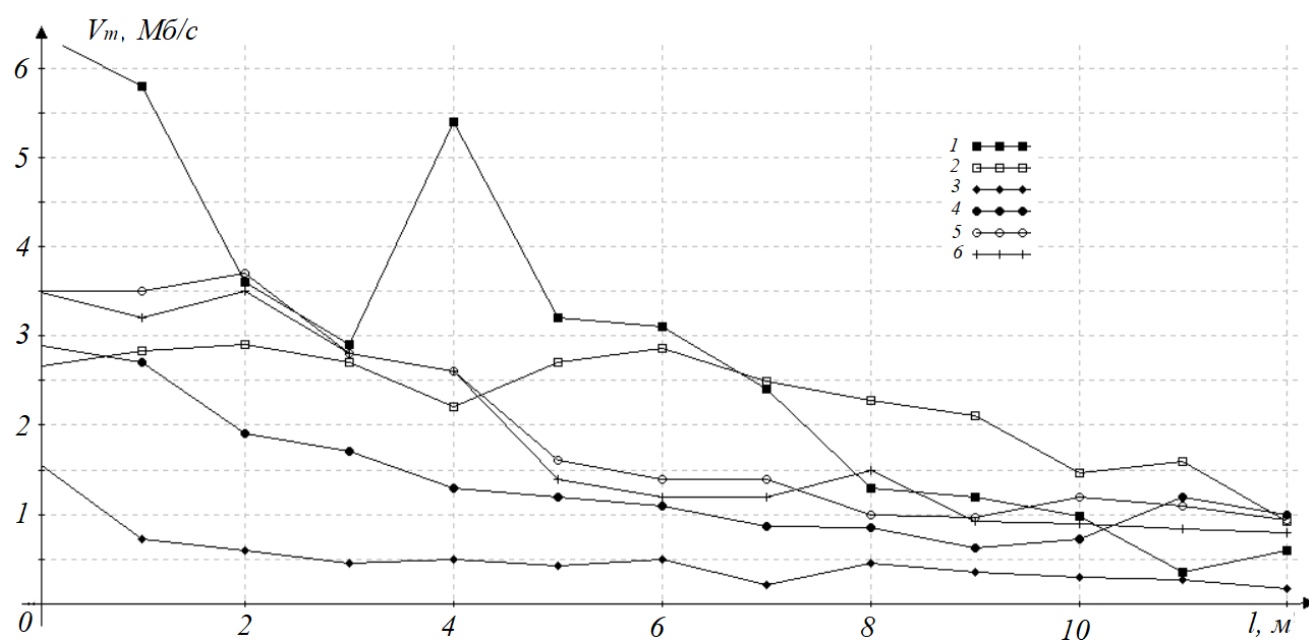
б)

Рис. 5.5. Залежність потужності сигналу на вході приймача (а) та ефективної швидкості передачі інформації (б) при існуванні сумісного частотного каналу для трьох абонентських пристроїв

Далі розглянемо результати експериментальних досліджень для умови сусіднього інтерференційного частотного каналу, які наведено на рис. 5.6 та рис. 5.7 відповідно.

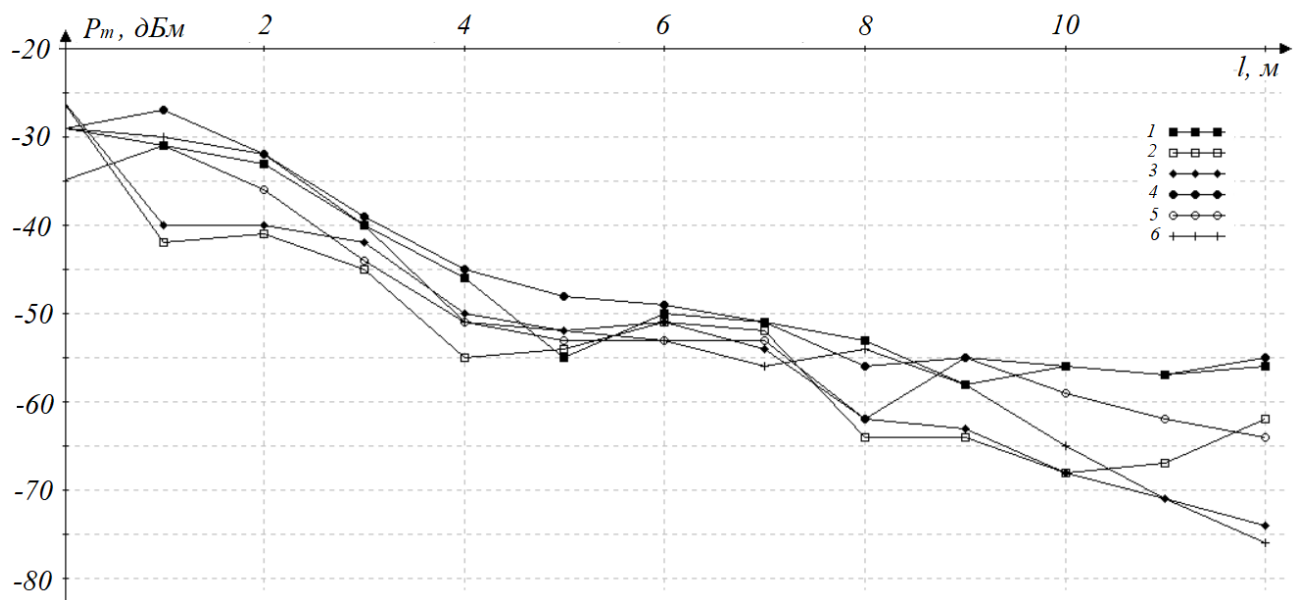


а)

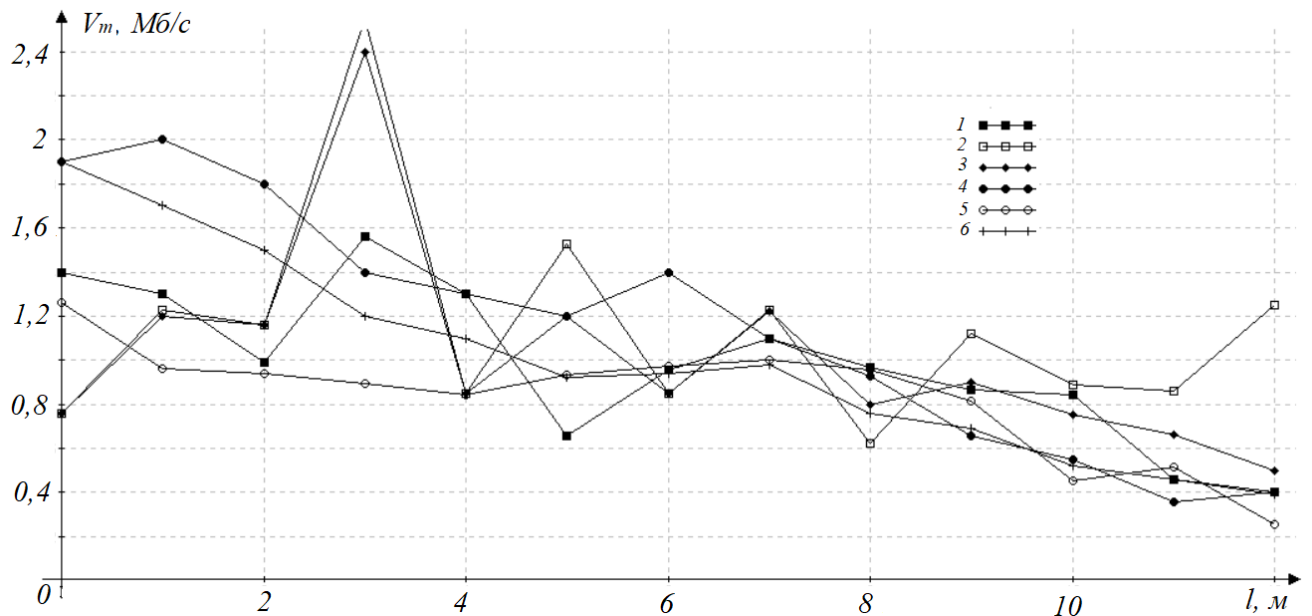


б)

Рис. 5.6. Залежність потужності сигналу на вході приймача (а) та ефективної швидкості передачі інформації (б) при існуванні сусіднього частотного каналу для двох абонентських пристроїв



а)



б)

Рис. 5.7. Залежність потужності сигналу на вході приймача (а) та ефективної швидкості передачі інформації (б) при існуванні сусіднього частотного каналу для трьох абонентських пристроїв

Умова існування сусіднього інтерференційного каналу, також створює високий рівень флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації. При усередненні результатів досліджень, при повній активності двох абонентів у

мережі, рівень впливу сусіднього інтерференційного радіоканалу наближається до суміщеного.

Інша ситуація виникає при наявності трьох пристроїв у мережі. В такому випадку, ефективна швидкість передачі інформації є вищою у 2-3 рази відносно випадку суміщеного частотного каналу, зокрема при використанні радіоканалу зі смугою 40 МГц.

Інтерференційні завади створюють конкуренцію за фізичний ресурс радіоканалу, тому, така завада буде мати вплив на кінцевий результат оцінювання параметрів P_{Rx} і V_{eff} . Тоді, є доцільним визначити показники енергетичного та інформаційного впливу інтерференційної завади.

Враховуючи вирази (5.8) і (5.9) показники впливу інтерференційних завад, можна записати так:

$$K_{in}^P = \frac{P_{Rx}^{in}(l)}{P_{Rx}^e(l)}, \quad K_{in}^V = \frac{V_{eff}^{in}(l)}{V_{eff}^e(l)}, \quad (5.20)$$

де $P_{Rx}^{in}(l)$ – регресійна модель оцінювання потужності сигналу на вході приймача при дії інтерференційної завади; $V_{eff}^{in}(l)$ – регресійна модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації при дії інтерференційної завади.

На основі результатів у розділі 3 та рис. 5.3, визначимо еталонні регресійні моделі для основних параметрів радіоканалу. Враховуючи позначення на графіках та нехтуючи інтервалами флуктуацій для лінійної і квадратичної залежностей енергетичного параметра, отримаємо:

$$P_{Rx}(l) = \begin{cases} -2,5l - 26, & \text{залежності 1,4;} \\ -3,3l - 27, & \text{залежності 2,5;} \\ -3,8l - 28, & \text{залежності 3,6;} \end{cases} \quad (5.21)$$

$$V_{eff}(l) = \begin{cases} -0,1l - 8,5, & \text{залежність 1;} \\ -0,4l - 8,5, & \text{залежність 2;} \\ -0,5l - 8,5, & \text{залежність 3;} \\ -0,15l + 15, & \text{залежність 4;} \\ -0,5l + 15, & \text{залежність 5;} \\ 0,8l + 15, & \text{залежність 6.} \end{cases} \quad (5.22)$$

Коефіцієнти регресійних моделей потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації при існуванні інтерференційної завади наведено у табл. 5.1.

Результати математичного дослідження енергетичного та інформаційного показників впливу (5.19) із врахуванням виразів (5.21) і (5.22) та коефіцієнтів у табл. 5.1, наведено на рис. 5.8 і рис. 5.9.

Отримані результати показників впливу на рис. 5.8 і рис. 5.9 підтверджують, що інтерференційні завади є вагомим фактором, який впливає на передавання інформації по радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж. Високі значення показників впливу біля ТД показують, що ІТД знаходилась на незначній відстані, тому, величина впливу інтерференційних завад залежить від кількості активних радіоканалів (включаючи радіоканали MIMO) у сумісному та сумісному частотних каналах одночасно.

Інтерференційні завади впливають на основні параметри радіоканалу по різному. Для параметра P_{Rx} існування таких завад показує незначне послаблення рівня сигналу, що збільшується відносно кількості активних абонентів. Це вказує на високі показники чутливості та селективності приймально-передавального обладнання. Відхилення інтерференційних моделей оцінювання від еталонної, в деякій мірі можна пояснити існуванням флуктуацій сигналу, що виникає із-за відбиття хвиль від стін та вносимих перешкод. В результаті цього, еталонна та інтерференційні моделі оцінювання будуть відрізнятися тільки допустимими інтервалами коефіцієнтів регресії (див. розділ 2).

Коефіцієнти регресійних моделей

№ залежн.	Суміщений канал							
	Два абоненти				Три абоненти			
	a	P_0	b	V_0	a	P_0	b	V_0
1	-2,15	-35	-0,45	5,6	-2	-37	-0,07	1,46
2	-2,7	-36	-0,25	3,5	-2,7	-39	-0,05	0,9
3	-3	-36	-0,25	3,4	-3,5	-34	-0,07	0,9
4	-2,6	-32	-0,1	1,2	-1,9	-38	-0,03	0,5
5	-2,4	-38	-0,18	2,7	-3,2	-34	-0,02	0,5
6	-3,3	-35	-0,2	2,7	-4	-30	-0,005	0,4
№ залежн.	Сусідній канал							
	Два абоненти				Три абоненти			
	a	P_0	b	V_0	a	P_0	b	V_0
1	-2	-36	-0,48	5,7	-2,3	-34	-0,07	3,4
2	-2,7	-38	-0,13	3,1	-2,9	-36	-0,03	1,3
3	-3,2	-34	-0,07	0,9	-3,5	-32	-0,05	1,4
4	-2,5	-36	-0,15	2,3	-2,6	-31	-0,14	2
5	-2,3	-39	-0,25	3,5	-2,8	-36	-0,06	1,2
6	-3,1	-35	-0,25	3,4	-3,8	-29	-0,12	1,7

Інша ситуація виникла із параметром ефективної швидкості передачі інформації V_{eff} , що приводить до значного зниження ефективної швидкості передачі інформації для окремого радіоканалу, за рахунок використання обмеженого частотного ресурсу та механізму боротьби між всіма активними радіоканалами, які попадають у суміщений і сусідній інтерференційні канали.

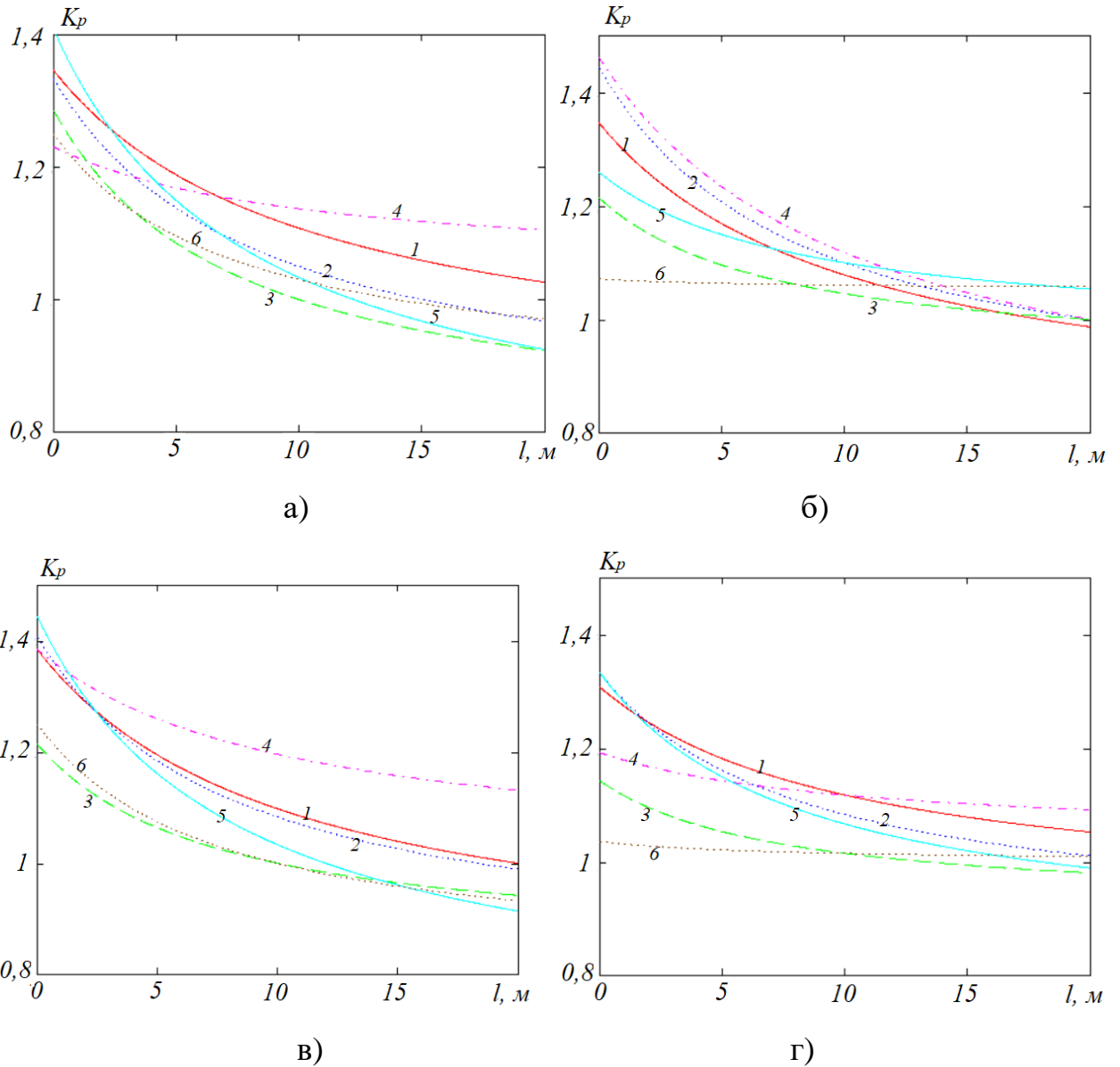
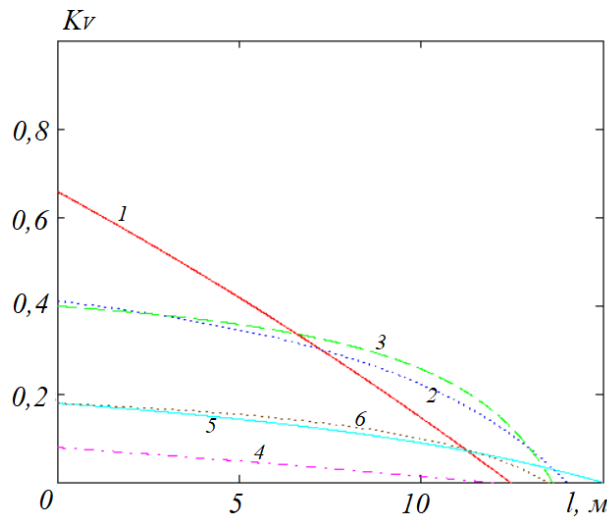
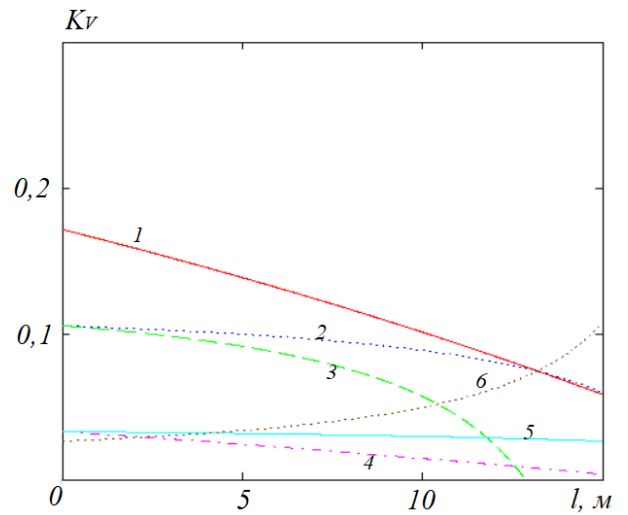


Рис. 5.8. Залежності енергетичного показника впливу від довжини радіоканалу для: а – суміщеного каналу двох абонентів; б – суміщеного каналу трьох абонентів; в – сусіднього каналу двох абонентів; г – сусіднього каналу трьох абонентів

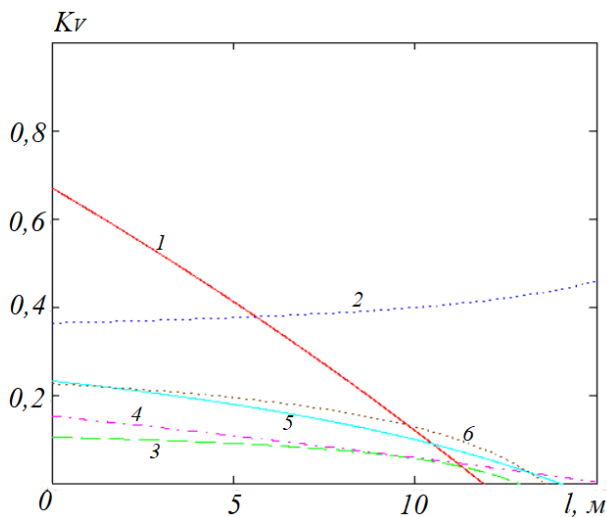
Різниця між моделями оцінювання ефективної швидкості передачі інформації виникає в певних значеннях коефіцієнтів спадання та початкових. Особливо це спостерігається для трьох абонентів.



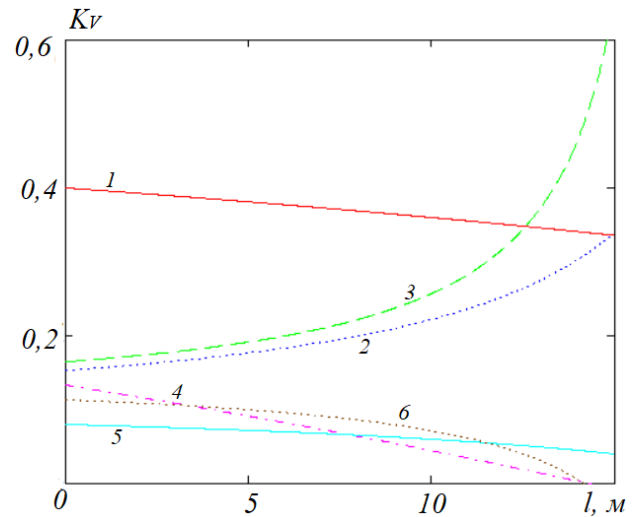
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.9. Залежності інформаційного показника впливу від довжини радіоканалу для: а – суміщеного каналу двох абонентів; б – суміщеного каналу трьох абонентів; в – сусіднього каналу двох абонентів; г – сусіднього каналу трьох абонентів

Для прикладу, застосування отриманих показників впливу інтерференційних завад у моделях (5.10) та (5.11), було проведено математичні дослідження радіоканалу стандарту 802.11n 40 МГц, на основі моделі (2.25) вимірювання параметра P_{Rx} та моделі (4.12) для параметра V_{eff} , а також моделі статистичного зв'язку (5.16). Результати наведено на рис. 5.10 та рис. 5.11.

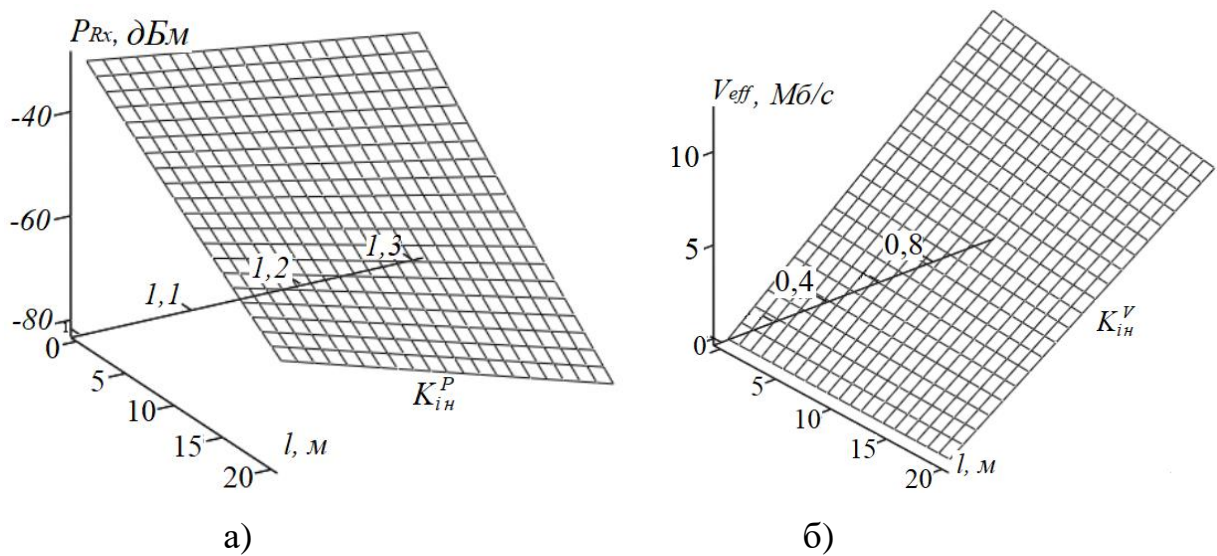


Рис. 5.10. Залежність параметра P_{Rx} від енергетичного показника впливу (а) та параметра V_{eff} від інформаційного показника впливу (б)

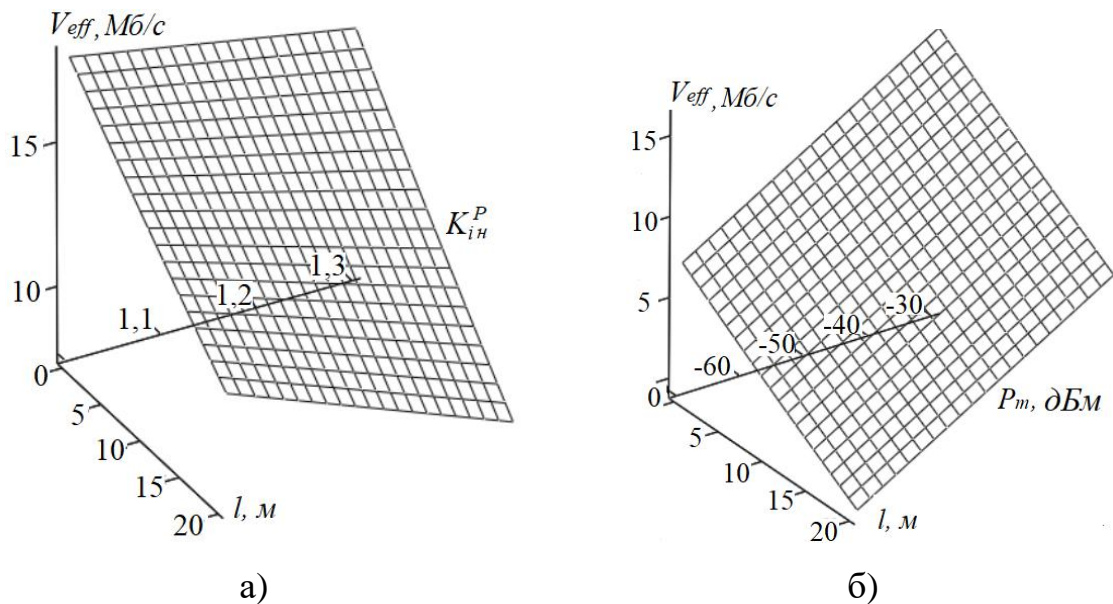


Рис 5.11. Залежність параметра V_{eff} моделі статистичного зв'язку від: а – енергетичного показника впливу інтерференційних завад; б – параметра P_m .

Отримані результати показують, що запропоновані показники впливу інтерференційних завад можна використовувати для моделей оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для всіх типів приміщень, в яких можуть існувати радіоканали довжиною до 20 м. Врахування енергетичного та інформаційного показників впливу

інтерференційних завад при оцінюванні основних параметрів радіоканалу буде мати різний характер, що говорить про необхідність використання інтегральних показників (5.12) і (5.13), для отримання високої достовірності оцінювання при існуванні складного радіооточення на етапах проектування та оптимізації. Недоліком такого оцінювання є необхідність мати базу експериментальних досліджень для різних умов. Якщо, в середовищі передачі присутні одна або декілька інтерференційних завад, то оцінювання можна виконати використовуючи модель статистичного зв'язку, для отримання швидкого результату, але із похибкою, яка буде збільшуватись за умов збільшення кількості інтерференційних мереж та активних абонентів.

5.3 Дослідження впливу архітектурних перешкод на параметри радіоканалу

Разом із інтерференційними завадами, іншим головним фактором впливу, що суттєво погіршує енергетичну та інформаційну ефективність радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi, є архітектурні перешкоди. Такі перешкоди присутні у всіх приміщеннях та створюють ефект поглинання (послаблення) сигналу в частотному діапазоні 1...6 ГГц, за рахунок проходження хвиль через середовище із вищою густиною, та ефект затухання, за рахунок створення відбиваючих поверхонь із багатопроменевим поширенням хвиль. Величина поглинання архітектурною перешкодою залежить від типу матеріалу, який використовується, та його густини. Найбільше поглинання сигналу мають бетон, метал, кераміка і дерево [26–28]. Крім того, тип матеріалу впливає на коефіцієнт відбиття сигналу. Тоді, можна говорити, що загальний вплив архітектурних перешкод має дві складові, що можна виразити як коефіцієнти затухання та послаблення сигналу. Але в реальних умовах, такі коефіцієнти одночасно впливають на енергетичну та інформаційну ефективність радіоканалу. Для знаходження показників впливу архітектурних перешкод запропоновано

використовувати статистичний зв'язок між основними параметрами радіоканалу та параметрами архітектурної перешкоди.

Архітектурними перешкодами у приміщеннях можна вважати стіни і перекриття між поверхами із врахуванням вікон та дверей, враховуючи тип матеріалу, що використовується. Додатковими перешкодами є різного роду об'єкти у приміщенні, що створюють додаткові відбиваючі поверхні. Тоді товщина таких перешкод, їх кількість та густина матеріалу, які можуть знаходитись між ТД та приймальним пристроєм мають вплив на параметри та характеристики радіоканалів при побудові корпоративних телекомунікаційних мереж. Для знаходження показників впливу архітектурних перешкод на параметри радіоканалів, було проведено експериментальні дослідження на базі безпроводної мережі із точкою доступу (ТД) та абонентського пристрою (АП), із використанням стандартів 802.11n та 802.11ac. Схема мережі наведено на рис. 5.12.

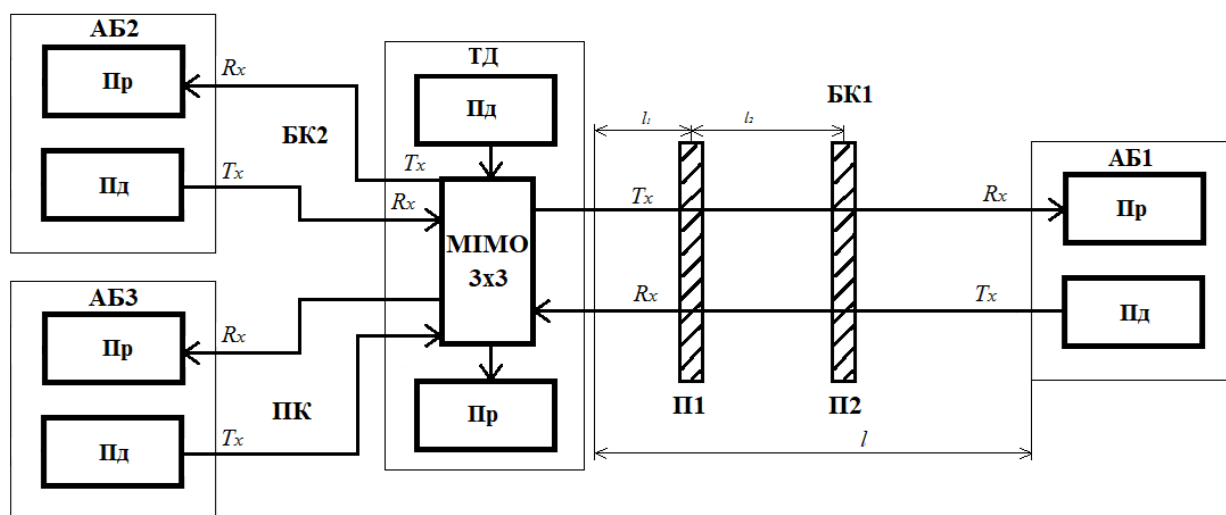


Рис.5.12. Структура мережі для дослідження впливу архітектурних перешкод

Дослідження проведено у приміщенні при умові коротких радіоканалів із довжиною l . В радіоканал вносились дві архітектурні перешкоди на відстані 3 м та 6 м від ТД. Використовувались два найбільш поширенні типи перешкод:

дерево, як перший тип, та цегли як другий. В приміщенні були відсутні шумові та інтерференційні завади.

Для початку виконаємо аналіз експериментальних досліджень на прикладі стандарту 802.11ac, оскільки, для діапазону 2,4 ГГц дослідження частково проведено в попередніх розділах (докладніше із дослідженням для стандарту 802.11n можна ознайомитись у роботі [82]).

Один активний радіоканал. Умова існування одного радіоканалу у мережі визначається схемою АБЗ-АБ1. Результати досліджень для прямої видимості, наведено на рис. 5.13.

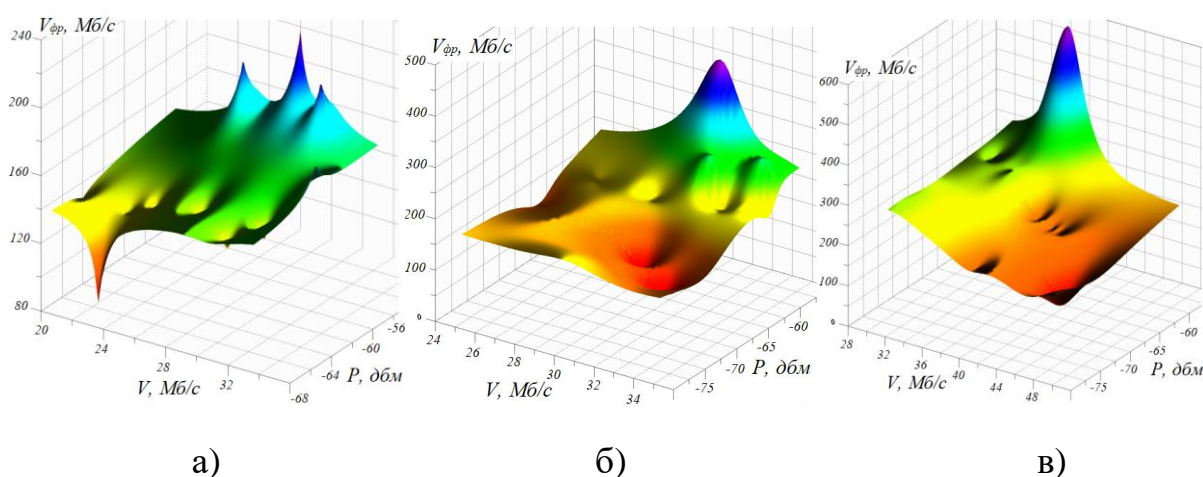


Рис. 5.13. Результати експериментальних досліджень одного радіоканалу для прямої видимості: а – для частотного каналу зі смугою 20 МГц; б – для частотного каналу зі смугою 40 МГц; в – для частотного каналу зі смугою 80 МГц.

Як видно із рис. 5.13, при прямій видимості, спостерігається робота радіоканалу у високопродуктивному режимі для всіх досліджуваних частотних каналів. Пропускна здатність радіоканалу показує максимальне значення біля зони енергетичного максимуму випромінювання ТД. Для всіх параметрів присутні незначні флуктуації.

Далі розглянемо випадок існування архітектурних перешкод у радіоканалі. Результати досліджень для перешкод типу «дерево» наведено на рис. 5.14.

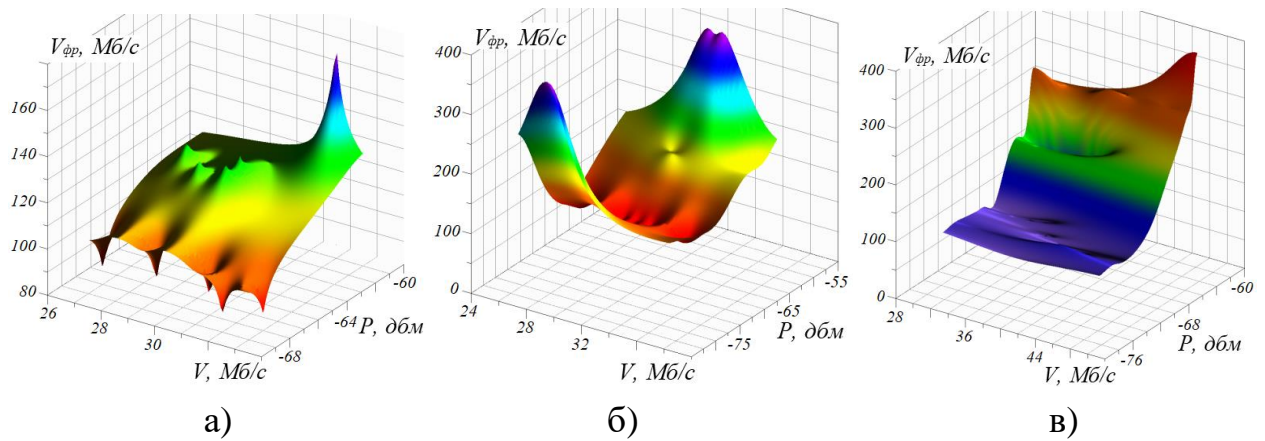


Рис. 5.14. Результати експериментальних досліджень одного радіоканалу при існуванні архітектурних перешкод типу «дерево»: а – для частотного каналу зі смугою 20 МГц; б – для частотного каналу зі смугою 40 МГц; в – для частотного каналу зі смугою 80 МГц.

В такому випадку, у середовищі передачі з'являються додаткові відбиваючі поверхні, які збільшують рівень флуктуацій сигналу безпосередньо біля перешкод. Пропускна здатність зменшується в середньому у 1,5..2 рази. Найбільші втрати спостерігаються для радіоканалу із смугою 80 МГц. На графіках існують досить виражені максимуми, що показує роботу механізму обміну службовою інформацією про стан радіоканалу між ТД та абонентським пристроєм. Це передбачає встановлення вищого значення схеми MCS у максимумах просторового розподілу потужності.

Наступний випадок – існування перешкод типу «цегла». Результати досліджень наведено на рис. 5.15.

При існуванні перешкод із більшою густиною, сигнал має більший коефіцієнт затухання, а ефективна швидкість передачі інформації має незначні флуктуації. Існування однієї перешкоди типу «цегла», є схожим до випадку існування двох перешкод типу «дерево».

Два активні радіоканали. Умова існування двох активних радіоканалів передбачає існування двох активних приймальних пристроїв, що одночасно

використовують радіочастотний ресурс радіоканалу (схема АБ2-АБ1). Результати досліджень для прямої видимості, наведено на рис. 5.16.

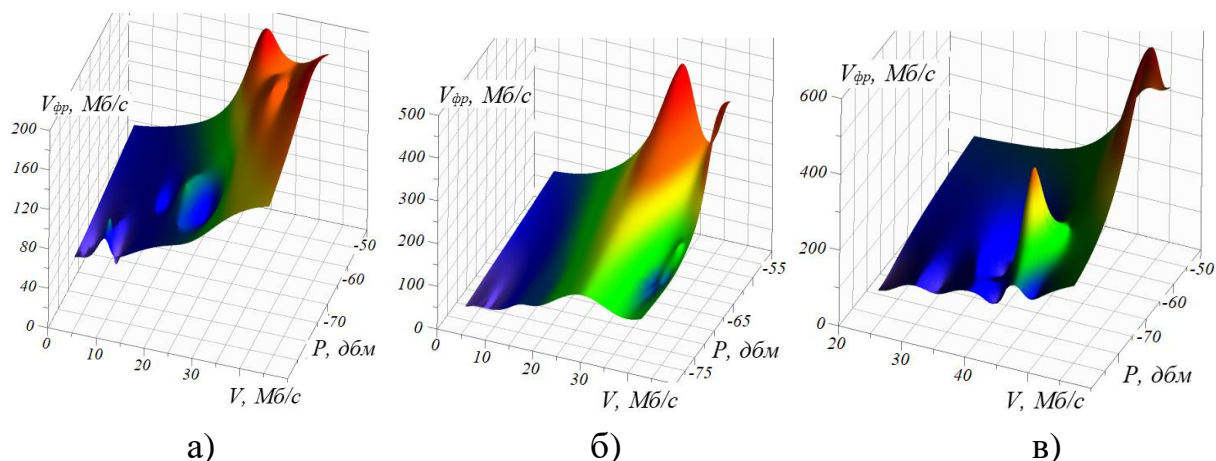


Рис. 5.15. Результати експериментальних досліджень одного радіоканалу при існуванні архітектурних перешкод типу «цегла»: а – для частотного каналу зі смугою 20 МГц; б – для частотного каналу зі смугою 40 МГц; в – для частотного каналу зі смугою 80 МГц.

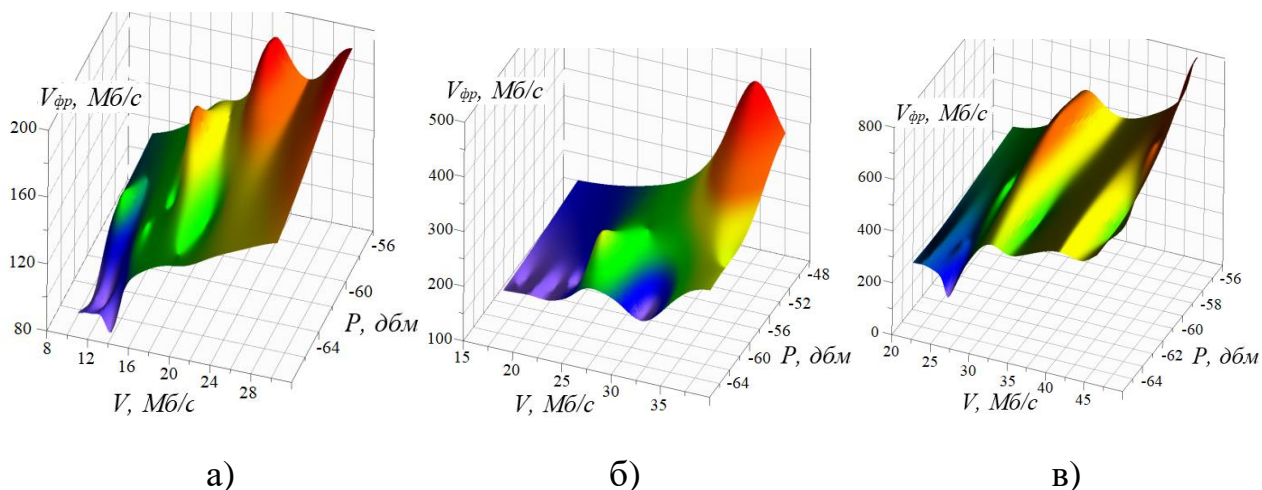


Рис. 5.16. Результати експериментальних досліджень двох радіоканалів для прямої видимості: а – для частотного каналу зі смугою 20 МГц; б – для частотного каналу зі смугою 40 МГц; в – для частотного каналу зі смугою 80 МГц

З точки зору приймального пристрою, при високій завантаженості радіоканалу, буде суттєве зменшення ефективної швидкості передачі інформації при довжині більше 5 м та меншій смузі частотного каналу. На відміну від

випадку інтерференційних завад, при існуванні архітектурних перешкод, широкосмгові радіоканали можуть забезпечити вищу ефективність на більшу відстань ніж вузькосмгові.

Результати досліджень, для умови існування архітектурних перешкод типу «дерево» і «цегла» наведено на рис. 5.17 та рис. 5.18 відповідно.

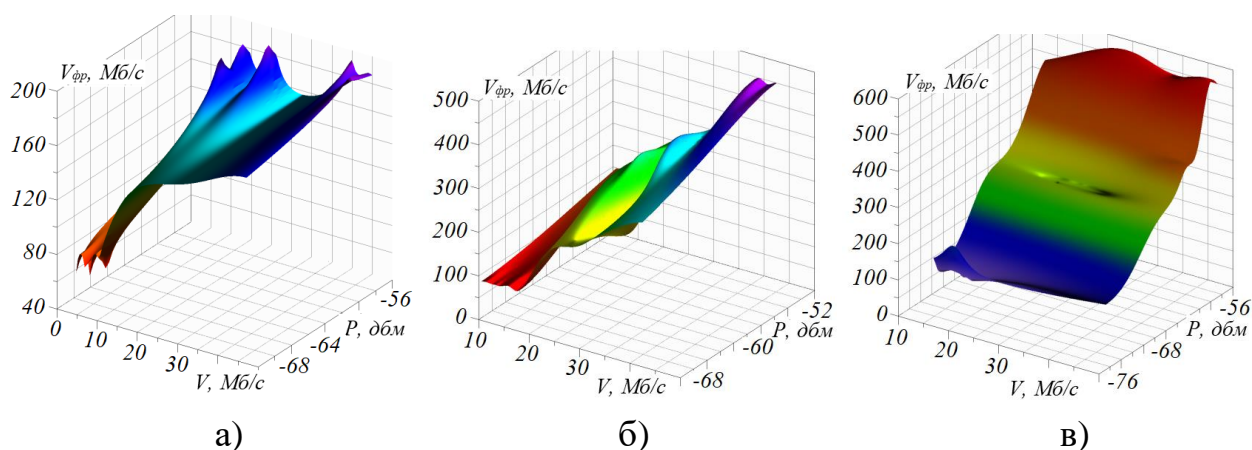


Рис. 5.17. Результати експериментальних досліджень двох радіоканалів при існуванні архітектурних перешкод типу «дерево»: а – для частотного каналу зі смугою 20 МГц; б – для частотного каналу зі смугою 40 МГц; в – для частотного каналу зі смугою 80 МГц.

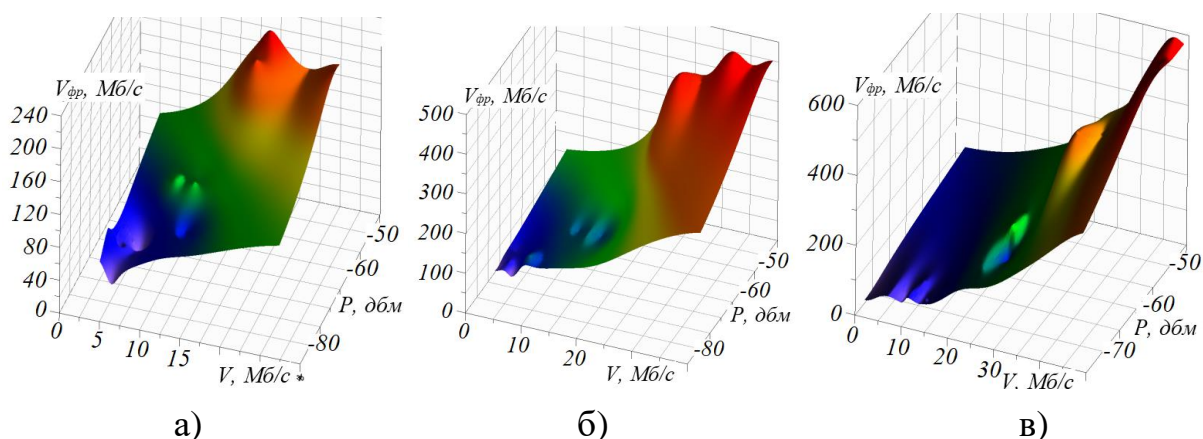


Рис. 5.18. Результати експериментальних досліджень двох радіоканалів при існуванні архітектурних перешкод типу «цегла»: а – для частотного каналу зі смугою 20 МГц; б – для частотного каналу зі смугою 40 МГц; в – для частотного каналу зі смугою 80 МГц.

Аналіз результатів на рис. 5.17 і рис. 5.18 показує аналогічний результат із випадком одного радіоканалу, але із меншими параметрами пропускної здатності та ефективної швидкості передачі інформації.

Застосуємо регресійний аналіз до отриманих результатів. Потужність сигналу має значну концентрацію енергії біля ТД, що значно зменшується на відстані більше двох метрів від випромінюючого блоку антен. Тоді, виконуючи усереднення, моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача від довжини радіоканалу можна записати так:

– для прямої видимості:

$$P_{Rx}(l) \approx -3l + P_m \pm \Delta P,$$

– для радіоканалу із перешкодами типу «дерево»:

$$P_{Rx}(l) \approx -6\ln(l) + P_m \pm \Delta P,$$

– для радіоканалу із перешкодами типу «цегла»:

$$P_{Rx}(l) \approx -4,5\ln(l) - 0,01l^2 - 0,1l + P_m \pm \Delta P,$$

Перешкоди із високою густиною змінюють характеристику згасання із лінійної на логарифмічну, оскільки вносять додатковий коефіцієнт згасання. Тоді, із експериментальних досліджень випливає, наступна нерівність для кінцевого результату оцінювання рівня сигналу із врахуванням архітектурних перешкод:

$$\left. \begin{array}{l} P_{Rx} - 3 \text{ dBm, пряма видимість} \\ P_{Rx} - 7 \text{ dBm, перешкода "дерево"} \\ P_{Rx} - 10 \text{ dBm, перешкода "цегла"} \end{array} \right\} < P < \left\{ \begin{array}{l} P_{Rx} + 3 \text{ dBm, пряма видимість} \\ P_{Rx} + 7 \text{ dBm, перешкода "дерево"} \\ P_{Rx} + 10 \text{ dBm, перешкода "цегла"} \end{array} \right. \quad (5.23)$$

Як показують результати досліджень, рівень потужності має виражені флуктуації, величина яких, залежить від типу архітектурних перешкод та кількості відбиваючих поверхонь. Отримані результати є подібними із результатами для інших різновидів стандартів 802.11, як у діапазоні 2,4 ГГц так і 5 ГГц, на основі чого, можна припустити, про схожість із стандартом 5G. Існування інтерференційних завад та значної кількості радіоканалів у середовищі передачі, в даному випадку, не дає суттєвих змін. Крім того, чим більша густина перешкоди, тим більший рівень флуктуацій потужності сигналу спостерігається на вході приймача.

Для параметрів V_{eff} і V_{pl} існування архітектурних перешкод, створює досить виражені флуктуації. Рівень таких флуктуацій залежить від певного порогового значення параметра P_{Rx} , при чому, зменшення його значення приводить до збільшення флуктуацій. Порогове значення має сильну залежність від кількості відбиваючих поверхонь та густини архітектурних перешкод. Флуктуації ефективної швидкості передачі інформації можуть підвищуватись за рахунок збільшення: смуги частотного каналу, кількості активних радіоканалів у корпоративній мережі, густини та кількості архітектурних перешкод.

Таким чином проведені експериментальні дослідження впливу архітектурних перешкод на параметри і характеристики радіоканалів, підтвердили поділ механізму дії із двох складових: поглинання енергії сигналу та коефіцієнт відбиття сигналу від поверхні перешкоди. Величина таких складових залежить від типу матеріалу (густини) і товщини (або кількості перешкод у радіоканалі). Існування перешкод викликає появу помилок у кадрах та збільшує кількість циклів перезапиту. Тому, аналогічно показникам впливу інтерференційних завад, існування архітектурних перешкод у радіоканалі можна розглядати як окремі одночасні дії на параметри потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації. Відповідно до виразів (5.10) і (5.11) показники впливу архітектурних перешкод можна записати так:

$$K_{an}^P = \frac{P_{Rx}^{an}(l)}{P_{Rx}^e(l)}, \quad K_{an}^V = \frac{V_{eff}^{an}(l)}{V_{eff}^e(l)}, \quad (5.24)$$

де $P_{Rx}^{an}(l)$ і $V_{eff}^{an}(l)$ – регресійні моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням архітектурної перешкоди; $P_{Rx}^e(l)$ і $V_{eff}^e(l)$ – еталонні регресійні моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації без перешкод.

Моделі регресії основних параметрів визначимо із експериментальних досліджень. Обмежуючись короткими радіоканалами до 16 м, представимо отримані результати для найбільш поширених стандартів 802.11n (із смугами частотних каналів 20 МГц і 40 МГц, частотного діапазону 2,4 ГГц) та 802.11ac (із смугами 40 МГц та 80 МГц). Для систематизації отриманих результатів, виконано усереднення результатів та введено наступні види позначень на графіках: 1 – пряма видимість між передавачем та приймачем без перешкод; 2 – в середовищі передачі існує перешкода першого типу; 3 – в середовищі передачі існує дві перешкоди першого типу; 4 – в середовищі передачі існує одна перешкода другого типу; 5 – в середовищі передачі існує дві перешкоди другого типу. Результати досліджень потужності сигналу на вході приймача показано на рис. 5.19.

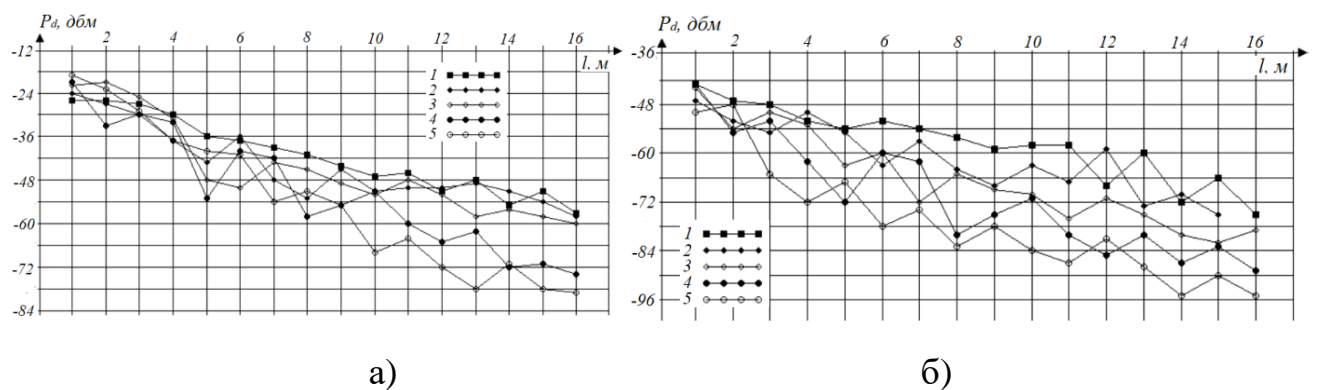


Рис. 5.19. Залежність потужності сигналу від довжини радіоканалу для: а – частотного діапазону 2,4 ГГц; б – для частотного діапазону 5 ГГц

Якщо, брати до уваги приміщення, як умову, що задає певні вимоги до функціонування мережі, то еталонна модель буде включати вплив фактору багатопроменевого поширення хвиль, що залежить від геометричних розмірів. Існування максимумів та мінімумів на характеристиках, для прямої видимості, є мінімальним на відміну від випадків із внесеними перешкодами. Внесення архітектурних перешкод додає відбиваючі поверхні, збільшуючи фактор впливу багатопроменевого поширення хвиль та вносить додатковий коефіцієнт згасання. Але, використовуючи усереднення та можливість застосування інтервалу флуктуацій у моделях оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів, можна вважати, що флуктуації взаємокомпенсуються.

Якщо застосувати регресійний аналіз до отриманих результатів, то можна отримати квадратичну або логарифмічну модель при значних згасаннях, що є справедливим при оцінюванні параметрів окремого радіоканалу із врахуванням факторів в комплексі, без положення перешкод у просторі. Для визначення коефіцієнтів згасання та послаблення для певного типу архітектурної перешкоди запропоновано використовувати інший підхід. Якщо застосувати лінійну регресію для всіх результатів вимірювання після перешкоди, то, в загальному, модель згасання сигналу, що створює архітектурна перешкода, можна записати так:

$$P_{Rx}^{an}(l) = a l + P_0, \quad (5.25)$$

де a – коефіцієнт згасання сигналу; P_0 – початковий рівень, що для моделей регресії після перешкод, є коефіцієнтом послаблення сигналу.

Залежність потужності сигналу на вході приймача від частотного діапазону та типу архітектурних перешкод, можна визначити на основі коефіцієнтів виразу (5.25). Наближенні значення коефіцієнтів наведено у табл. 5.2.

Як видно із отриманих результатів у табл. 5.2, матеріал та товщина перешкоди має вплив як на коефіцієнт згасання сигналу, так і на його послаблення безпосередньо після перешкоди.

Коефіцієнти лінійної регресії $P_{Rx}^{an}(l)$

Коеф.	2,4 ГГц					5 ГГц				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
a	-2	-2,1	-2,2	-2,5	-2,8	-1,6	-1,7	-1,9	-2,1	-2,4
P_0	-24	-27	-28	-32	-36	-44	-46	-50	-54	-58

Розглянемо отримані результати досліджень для ефективної швидкості передачі інформації, які наведено на рис. 5.20.

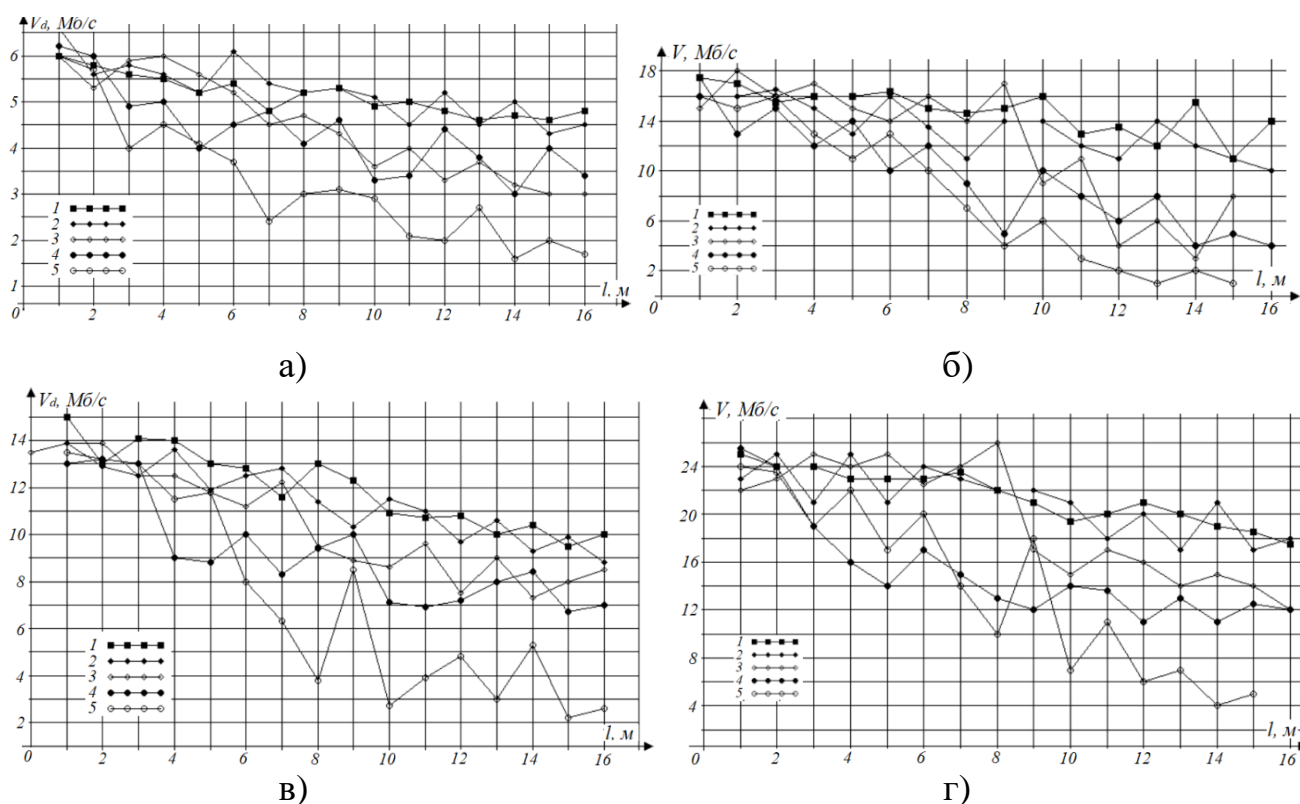


Рис. 5.20. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу для: а – стандарту 802.11n 20 МГц; б – стандарту 802.11ac 40 МГц; в – стандарту 802.11n 40 МГц; г – стандарту 802.11ac 80 МГц

Аналогічно до параметра P_{Rx}^{an} , модель регресії для ефективної швидкості передачі інформації можна записати так:

$$V_{eff}^{an}(l) = bl + V_0, \quad (5.26)$$

де b – коефіцієнт затухання для характеристики залежностей ефективної швидкості передачі інформації; V_0 – початковий рівень або коефіцієнт послаблення.

Наближенні значення коефіцієнтів виразу (5.26) для радіоканалів відповідних стандартів, що досліджуються, наведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Коефіцієнти лінійної регресії для $V_{eff}^{an}(l)$

Коеф.	802.11n 20 МГц					802.11n 40 МГц				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
b	-0,08	-0,09	-0,12	-0,09	-0,12	-0,32	-0,32	-0,35	-0,32	-0,35
V_0	6	6	5	4,8	3,8	14,8	14,3	13	11,5	8,5
	802.11ac 40 МГц					802.11ac 80 МГц				
b	-0,3	-0,35	-0,4	-0,42	-0,5	-0,45	-0,46	-0,5	-0,46	-0,7
V_0	17,2	16,5	12	12	9	25	25	21	18	16

Якщо припустити, що пряма видимість є результатом отримання еталонних моделей $P_{Rx}^{an}(l)$ і $V_{eff}^{an}(l)$, то підставляючи вирази (5.25) та (5.26) у (5.24) та враховуючи коефіцієнти лінійної регресії у табл. 5.2 та табл. 5.3, отримаємо моделі розрахунку енергетичних і інформаційних показників впливу архітектурних завод, які можна записати так:

$$K_{an}^P = \left\{ \frac{a_n l - P_0^n}{-2l - 24}, \quad K_{an}^V = \begin{cases} \frac{b_n l - V_0^n}{-0,08l + 6}, & \text{для } 802.11n \text{ } 20\text{МГц}; \\ \frac{b_n l - V_0^n}{-0,32l + 4,8}, & \text{для } 802.11n \text{ } 40\text{МГц}; \end{cases} \quad (5.27)$$

$$K_{an}^P = \begin{cases} \frac{a_n l - P_0^n}{-1,6l - 44}, & K_{an}^V = \begin{cases} \frac{b_n l - V_0^n}{-0,3l + 17,2}, & \text{для } 802.11ac \text{ } 40\text{МГц}; \\ \frac{b_n l - V_0^n}{-0,45l + 25}, & \text{для } 802.11ac \text{ } 80\text{МГц}; \end{cases} \end{cases} \quad (5.28)$$

де n – номер випадку для оцінювання архітектурних перешкод.

Запропоновані показники дають можливість, оцінювати вплив архітектурних перешкод на основні параметри радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. Вони є справедливими для коротких радіоканалів із довжиною до 16 м та є незалежними від ефекту багатопроменевого поширення хвиль, що вносять об'єкти у приміщенні. На відміну від існуючих досліджень, такі показники враховують коефіцієнти згасання та послаблення, що дає можливість враховувати густину, товщину або кількість перешкод, та їх вплив на багатопроменеве поширення хвиль. Але для підвищення достовірності оцінювання необхідно проведення значної кількості експериментальних досліджень та створення бази коефіцієнтів, що є недоліком.

Для прикладу, можна навести математичні дослідження моделей (5.27) і (5.28) для стандартів 802.11n 40 МГц діапазону 2,4 ГГц та 802.11ac 40 МГц. Результати наведено на рис. 5.20 і рис. 5.21.

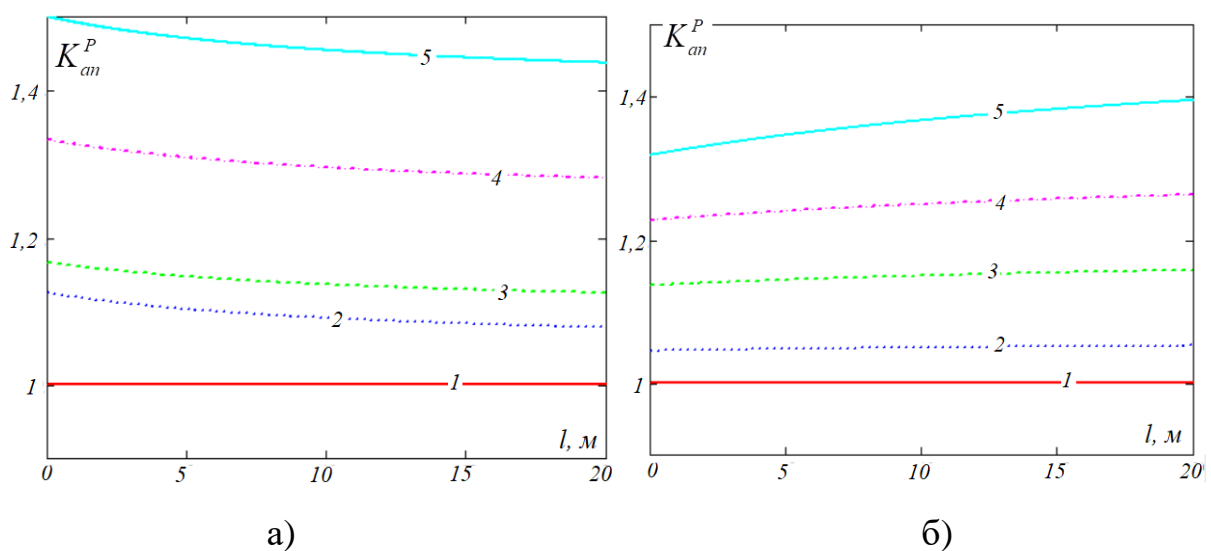


Рис. 5.20. Залежність енергетичного коефіцієнту впливу архітектурних перешкод від довжини радіоканалу: а – для 802.11n 40 МГц; б – для 802.11ac 40 МГц

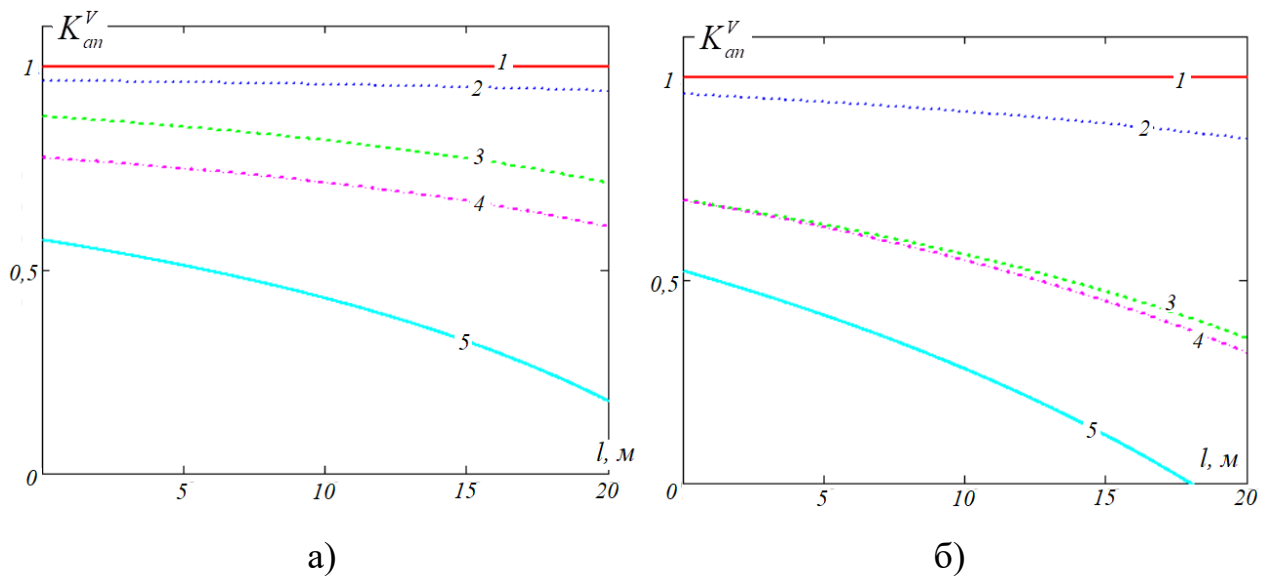


Рис. 5.21. Залежність інформаційного коефіцієнту впливу архітектурних перешкод від довжини радіоканалу: а – для 802.11n 40 МГц; б – для 802.11ac 40 МГц

Як видно із результатів на рис. 5.20, енергетичний коефіцієнт впливу архітектурних перешкод майже не залежить від коефіцієнта згасання та в більшості випадків може бути прирівняний до коефіцієнта послаблення. Інформаційний коефіцієнт впливу, на рис. 5.21, має значну залежність від коефіцієнта згасання, що пояснюється значним збільшенням кількості помилок у кадрах та кількості циклів повторної передачі після перешкоди.

5.4 Дослідження впливу виробничо-експлуатаційних відхилень параметрів приймальних пристроїв на характеристики радіоканалу

На часові та каналні залежності ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, діють енергетичні фактори впливу, які пов'язанні із приймально-передавальним обладнанням до яких можна віднести: вихідна потужність передавача; коефіцієнти підсилення антен; якість провідників та з'єднувачів; селективність приймача; чутливість приймача. Сучасне обладнання стандартів 5G/Wi-Fi, має потужність

випромінювання сигналу від 12 дБм (малопотужні) до 28 дБм (високопотужні), крім того застосовуються зовнішні антени із коефіцієнтом підсилення від 2 дБі (вбудовані) та зовнішні до 25 дБі і вище. Оскільки, рівень випромінювання передавачів є стандартизованими, тому одним із важливих факторів, що впливає на основний критерій ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж, є якість приймального пристрою – здатність правильно виділяти корисний сигнал із середовища передачі на фоні шумових та інтерференційних завад. Цей фактор визначається мінімально допустимим рівнем сигналу, при якому приймач може декодувати інформацію із заданою точністю або заданим рівнем сигнал/шум [255]. В стандартах 5G/Wi-Fi на основі цього параметра встановлюється режим роботи радіоканалу схемою MCS. По суті такий параметр буде показувати якість компонентної бази та ефективність проектування приймального пристрою, що є виробничо-експлуатаційними показником передавально-приймального обладнання, а відхилення від норм – фактором впливу (пристрої різних виробників будуть мати різні характеристики). Для підтвердження такого припущення, можна розглянути часові характеристики зміни рівня потужності сигналу на вході приймача, використовуючи програмно-апаратні засоби моніторингу для різних пристроїв. Для дослідження використаємо три різних абонентських пристрої, один із яких має додаткову зовнішню антену. Результати досліджень наведено на рис. 5.22.

Як видно із отриманих результатів на рис. 5.22, для кожного абонентського пристрою існують відмінності у можливостях оцінювання параметра потужності сигналу на вході приймача та рівнів шумових і інтерференційних завад. Це означає, що використання загальних моделей оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, буде приводити до появи похибки для різних пристроїв, особливо при існуванні великої кількості суміщених та сусідніх інтерференційних завад.

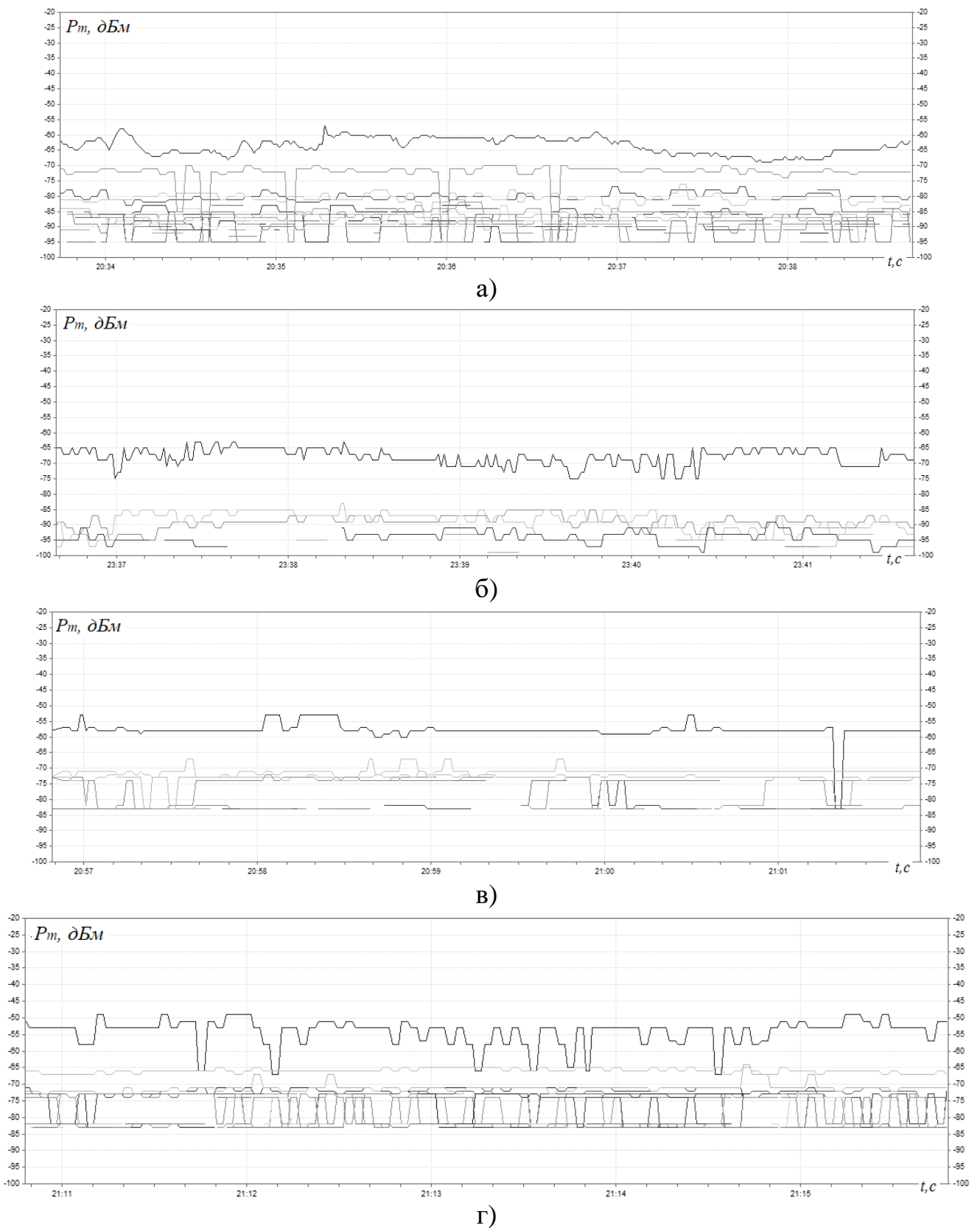


Рис. 5.21. Часова залежність потужності сигналу на вході приймача для: першого пристрою (а); другого пристрою (б); третього пристрою (в); та третього пристрою із зовнішньою антеною (г)

Проведемо аналіз впливу такого фактору на ефективну швидкість передачі інформації припускаючи, що абонентські пристрої різних виробників будуть по різному виділяти корисний сигнал із середовища із-за відхилення значень параметра чутливості. Для цього, було проведено дослідження значної кількості абонентських пристроїв, які працювали у стандартах 802.11b, 802.11g, 802.11n [120, 121, 149]. В роботі обмежимося результатами досліджень для стандарту 802.11n із смугою частотних каналів 20 МГц та 40 МГц та використанням ТД із однією та трьома антенами. Встановлено, що абонентські пристрої, що досліджувались, можна поділити на групи із схожими характеристиками. Результати для груп представимо на основі пристроїв та наступних позначень: два пристрої Пр1 і Пр2, які позначаються кривою 1 та кривою 2; пристрій із максимальною чутливістю (Пр3), який існував на ринку – крива 3; високочутливий пристрій із додатковою зовнішньою антеною (Пр4) – крива 4.

Результати досліджень представимо з точки зору впливу на ефективну швидкість передачі інформації, як параметра від якого залежить якість обслуговування. Для випадку одного активного абонента у мережі отримані залежності наведено на рис. 5.22.

Як видно із результатів досліджень на рис. 5.22, у стандарті 802.11n більша чутливість приймача має негативний ефект для вузькосмугових частотних каналів, що приводить до збільшення рівня шумів та завад. Такий ефект має менший вплив для широкосмугових радіоканалів та, при застосуванні більшої кількості антен, підвищує середнє значення ефективної швидкості передачі інформації. Аналогічна ситуація спостерігається і у інших різновидах стандартів 802.11, що можна пояснити використанням модуляції QAM починаючи із стандарту 802.11n. Така модуляція є більш вимогливою до параметра сигнал/шум, але розширення спектра сигналу збільшує пропускну здатність радіоканалу теоретично у два рази: 20 МГц, 40 МГц, 80 МГц і 160 МГц. В такому випадку перехід на радіоканал із більшою смугою сумарно дасть більший ефект по відношенню до зниження при зменшенні параметра сигнал/шум, але при значній кількості інтерференційних завад, радіоканал із меншою смугою буде показувати кращі результати.

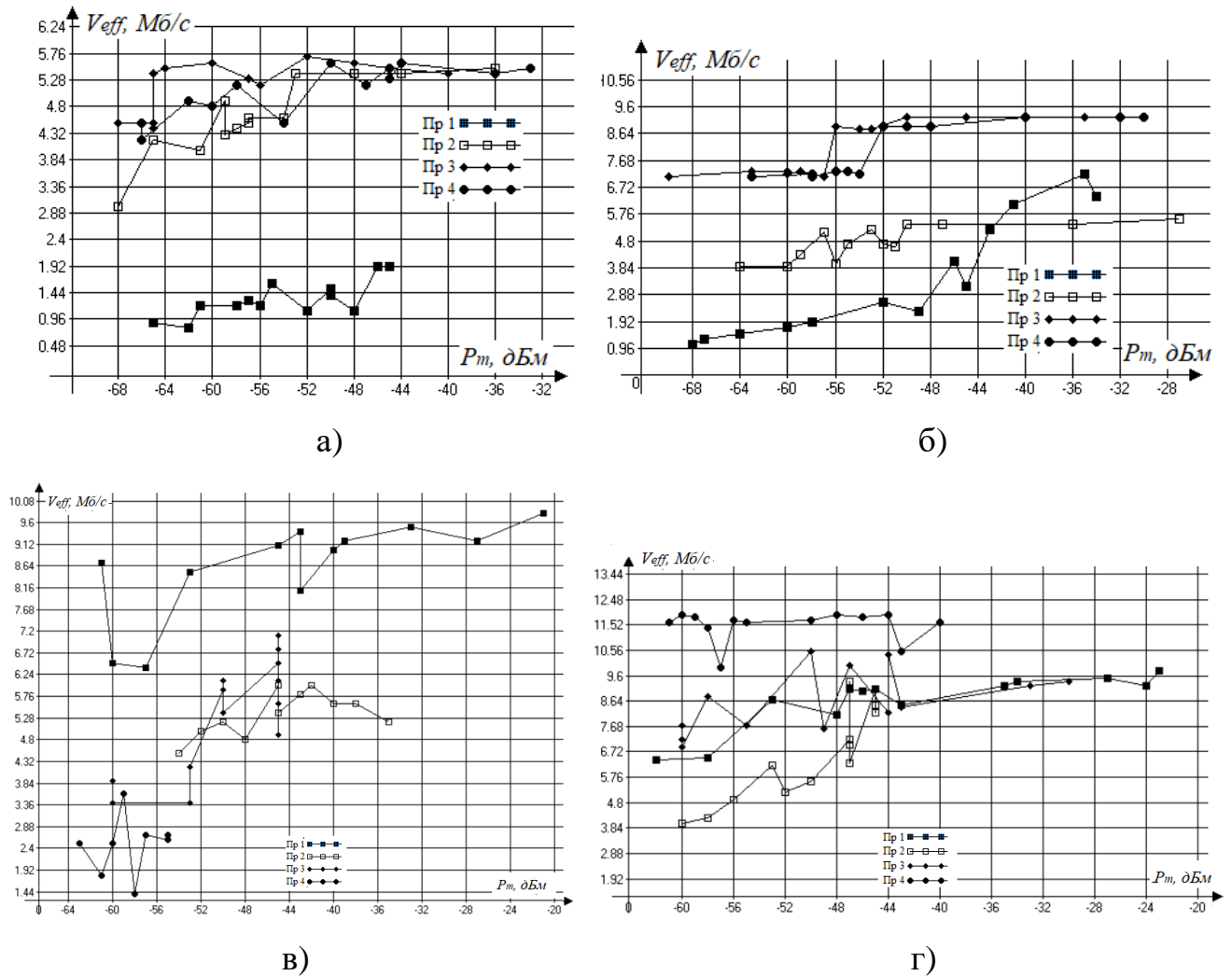


Рис. 5.22. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від потужності сигналу на вході приймача при існуванні одного активного абонента у мережі для: а – радіоканалу 802.11n 20 МГц та ТД із однією антеною; б – радіоканалу 802.11n 40 МГц та ТД із однією антеною; в – радіоканалу 802.11n 20 МГц та ТД із трьома антенами; г – радіоканалу 802.11n 40 МГц та ТД із трьома антенами

Далі розглянемо дослідження для випадку існування двох активних абонентів у мережі. Результати наведено на рис. 5.23.

Аналіз досліджень на рис. 5.23 показує, рівномірність залежностей та найменший коефіцієнт спадання ефективної швидкості передачі для високочутливих абонентських пристроїв. Але в загальному характер залежностей залишається аналогічний до попереднього випадку.

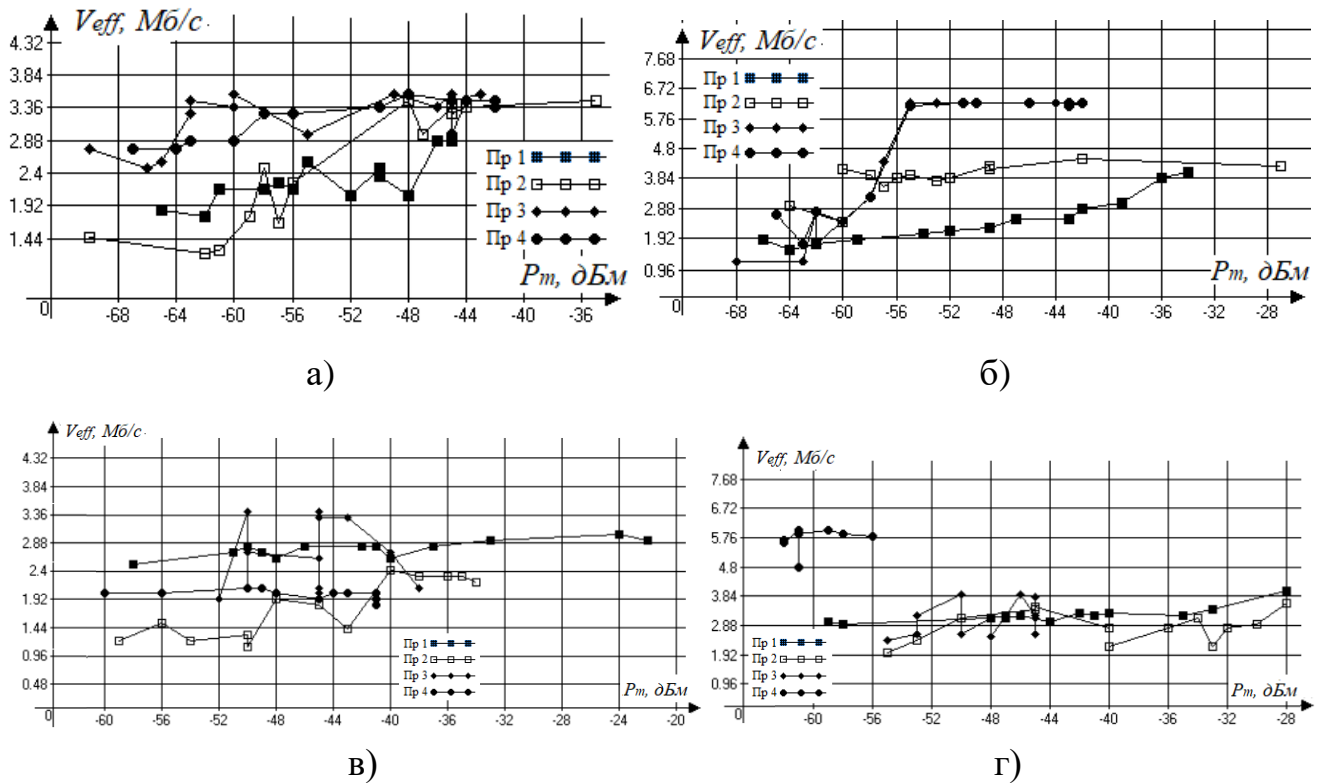


Рис. 5.23. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від потужності сигналу на вході приймача при існуванні двох активних абонентів у мережі для: а – радіоканалу 802.11n 20 МГц та ТД із однією антеною; б – радіоканалу 802.11n 40 МГц та ТД із однією антеною; в – радіоканалу 802.11n 20 МГц та ТД із трьома антенами; г – радіоканалу 802.11n 40 МГц та ТД із трьома антенами

В загальному, проведені дослідження показують, що для кожного абонентського пристрою існує гранична межа параметра потужності сигналу на вході приймача, нижче якої ефективна швидкість передачі інформації має значний коефіцієнт спадання і має відхилення для пристроїв різних виробників. На усереднене граничне значення потужності сигналу на вході приймача має вплив кількість одночасно активних абонентських пристроїв у мережі. Для Пр1 і Пр2 границя становить від 56 дБм і для Пр3 і Пр4 – 60..65 дБм.

Визначимо показники впливу параметрів абонентських пристроїв різних виробників на параметри і характеристики радіоканалу. Відповідно до виразів

(5.10) і (5.11) коефіцієнти впливу параметрів абонентських пристроїв різних виробників можна записати так:

$$K_n^P = \frac{P_{Rx}^n(l)}{P_{Rx}^e(l)}, \quad K_n^V = \frac{V_{eff}^n(l)}{V_{eff}^e(l)}, \quad (5.29)$$

де $P_{Rx}^n(l)$ і $V_{eff}^n(l)$ – регресійні моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням архітектурної перешкоди; $P_{Rx}^e(l)$ і $V_{eff}^e(l)$ – еталонні регресійні моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації без перешкод.

Для визначення регресійних моделей із впливом характеристик різноманітних пристроїв різних виробників, проведено розширені експериментальні дослідження на основі корпоративної телекомунікаційної мережі Wi-Fi при існуванні одного активного радіоканалу та із мінімальним впливом інтерференційних завад. Основними параметрами для досліджень є вимірювальні значення ефективної швидкості передачі інформації V_m , пропускної здатності V_{pl} і потужності сигналу на вході приймача P_m , які можна отримати за допомогою програмно-апаратних засобів моніторингу та додатків прикладного рівня. Для досліджень було обрано три абонентських пристрої (Пр1, Пр2, Пр3) та три точки доступу (ТД1, ТД2, ТД3). Також, використовувався радіоканал стандарту 802.11n із смугою 20 МГц у частотних діапазонах 2,4 ГГц та для 5 ГГц. Для аналізу отриманих результатів експериментальних досліджень введено наступні види позначень на графіках для частотного діапазону 2,4 ГГц: 1 – Пр1 та ТД1; 2 – Пр2 та ТД1; 3 – Пр3 та ТД1; 4 – Пр1 та ТД2; 5 – Пр2 та ТД2; 6 – Пр3 та ТД2; 7 – Пр1 та ТД3; 8 – Пр2 та ТД3; 9 – Пр3 та ТД3. В діапазоні 5 ГГц: 10 – Пр2 та ТД1; 11 – Пр1 та ТД1.

Результати експериментальних досліджень основних параметрів радіоканалу для довгих каналів, наведено на рис. 5.24.

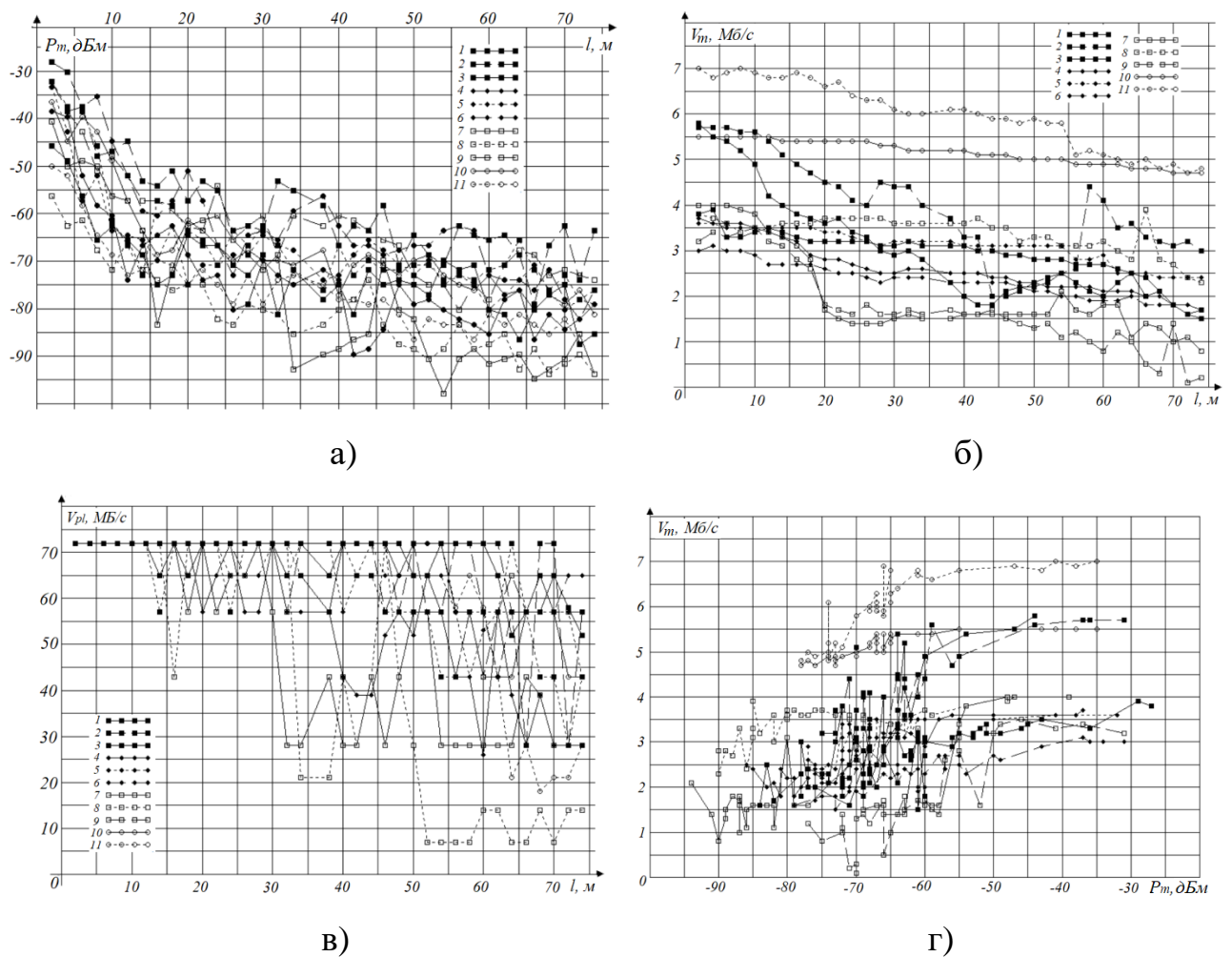


Рис. 5.24. Результати досліджень основних параметрів радіоканалу: а – залежність потужності сигналу на вході приймача від довжини; б – залежність ефективної швидкості передачі інформації від довжини; в – залежність пропускної здатності від довжини; г – залежність ефективної швидкості передачі інформації від потужності сигналу на вході приймача

Аналіз отриманих експериментальних результатів на основі методів регресії, дав узагальнені моделі, які можна записати так:

$$\begin{aligned}
 P_{Rx}^n(l) &= a \ln(l) + P_0, \\
 V_{eff}^n(l) &= bl + V_0.
 \end{aligned}
 \tag{5.30}$$

Числові значення коефіцієнтів моделей (5.30) наведено у табл. 5.4.

Числові значення коефіцієнтів регресії (5.30)

Параметр		a	P_0	b	V_0
Пр1 2,4 ГГц	ТД1	-8,6	-40	-0,05	5,5
	ТД2	-12	-30	-0,025	3,5
	ТД3	-15	-21	-0,03	3,6
Пр2 2,4 ГГц	ТД1	-11	-27	-0,04	5,5
	ТД2	-9,5	-34	-0,02	3,8
	ТД3	-10	-44	-0,015	4
Пр3 2,4 ГГц	ТД1	-11	-18	-0,02	3,7
	ТД2	-12	-18	-0,02	3,1
	ТД3	-11	-23	-0,04	3,3
Пр1 5 ГГц	ТД1	-9,4	-42	-0,03	7,2
Пр2 5 ГГц	ТД1	-12	-25	-0,01	5,6

На основі отриманих результатів коефіцієнтів регресії для різних досліджуваних пристроїв, можна говорити про існування певних інтервалів Δa і Δb . Такі інтервали можна наближено визначити як довірчий інтервал регресії із статистичною імовірністю 0,99. Найбільша відмінність спостерігається між початковими рівнями P_0 і V_0 , які пов'язані із вимірюванням у контрольній точці (див. розділ 2). Частотний діапазон радіоканалу майже не вносить змін для параметра потужності сигналу, але має відмінності для ефективної швидкості передачі інформації. Це пояснюється існування різного роду факторів впливу. Таким чином, основна різниця між різними пристроями Wi-Fi буде визначатись початковими рівнями моделей оцінювання основних параметрів радіоканалу.

Якщо, враховуючи умови оцінювання P_m і V_m на основі програмно-апаратних засобів моніторингу, то вираз для розрахунку середньостатистичних початкових значень основних параметрів можна записати так:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_m - a \ln 2, \\ V_0 &= V_m - 2b, \end{aligned} \quad (5.31)$$

Підставляючи (5.31) в (5.30), отримаємо модель оцінювання основних параметрів радіоканалів, з врахуванням параметра довжини:

$$\begin{aligned} P_{Rx}^n(l) &= (a \pm \Delta a)(\ln(l) - \ln 2) + P_m + \Delta P_0, \\ V_{eff}^n(l) &= (b \pm \Delta b)(l - 2) + V_m + \Delta V_0, \end{aligned} \quad (5.32)$$

де ΔP_0 і ΔV_0 — відхилення початкових рівнів від середньостатистичного значення, що спричинене фактором впливу різноманітних пристроїв різних виробників.

На основі моделі (3.19) можна оцінювати основні параметри приймальних пристроїв на основі програмно-апаратних засобів моніторингу. Тоді, підставляючи (5.32) у (5.29), показники впливу параметрів абонентських пристроїв різних виробників, можна записати так:

$$K_n^P = \frac{(a \pm \Delta a)(\ln(l) - \ln 2) + P_m + \Delta P_0}{a(\ln(l) - \ln 2) + P_m}, \quad (5.33)$$

$$K_n^V = \frac{(b \pm \Delta b)(l - 2) + V_m + \Delta V_0}{b(l - 2) + V_m}. \quad (5.34)$$

Далі розглянемо статистичний зв'язок між основними параметрами радіоканалів P_m і V_{eff} (див. розділ 4). Результати досліджень для такого випадку показано на рис. 5.24. г. Тут наближеною моделлю є лінійна регресія, але при внутрішньому обмеженні пропускнуої здатності пристрою, що досить часто зустрічається, модель набуває форми квадратичної регресії. Таким чином, отримаємо:

$$V_{eff}^n(P_m) = \begin{cases} KP_m + S_1, \\ K_1P_m^2 + K_2P_m + S_2, \end{cases} \quad (5.35)$$

де K , K_1 , K_2 – коефіцієнти спадання відповідних регресій; S_1 , S_2 – середньостатистичні значення початкових рівнів регресій.

Числові значення коефіцієнтів моделі (5.35) наведено у табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Числові значення коефіцієнтів регресії

Параметр		K	S_1	K_1	K_2	S_2
Пр1	ТД1	0,11	10,8	-0,0011	0,26	15,7
	ТД2	0,05	6,2	-0,0002	0,01	4,5
	ТД3	0,03	4,2	0,0016	0,27	12,8
Пр2	ТД1	0,1	10	-0,0014	-0,08	4,7
	ТД2	0,04	5,8	-0,001	-0,1	1,5
	ТД3	0,06	8	-0,0016	-0,2	2,5
Пр3	ТД1	0,04	5	-0,0005	-0,013	3,8
	ТД2	0,03	4,2	-0,0003	-0,006	3,2
	ТД3	0,08	6,5	-0,0004	0,03	5
Пр1	ТД1 5 ГГц	0,04	8	-0,0009	-0,08	3,8
Пр2	ТД1 5 ГГц	0,08	11	0,0025	-0,24	1,4

Для Пр1 і Пр2 та точки доступу ТД1, коефіцієнт спадання K змінюється в межах довірчого інтервалу. Ці пристрої мають високу швидкодію внутрішньої шини. Аналогічний результат показує початковий параметр регресії S_1 . Але, при існуванні невідповідності пропускну здатності внутрішньої шини ТД до абонентського пристрою, виникає різниця між розрахованим, на основі моделі, та реальними значеннями.

Тоді, враховуючи довірчий інтервал регресії, та коефіцієнт зв'язку, модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації (5.36) можна записати так:

$$V_{\text{eff}}^n(P_m) = \begin{cases} (K \pm \Delta K)P_m + S_1, & \text{якщо } r_{\text{кв}}^2 \approx r_l^2, \\ (K_1 \pm \Delta K_1)P_m^2 + (K_2 \pm \Delta K_2)P_m + S_2, & \text{якщо } r_{\text{кв}}^2 \approx \begin{cases} r_l^2 + 0,15, & \text{для } 2,4\text{ГГц}, \\ r_l^2 + 0,2, & \text{для } 5\text{ГГц}. \end{cases} \end{cases} \quad (5.36)$$

де $r_{\text{кв}}^2$ і r_l^2 – коефіцієнти зв'язку для квадратичної та лінійної регресії відповідно; ΔK , ΔK_1 і ΔK_2 – межі довірного інтервалу відповідних коефіцієнтів.

Аналогічно до виразу (5.34), показник впливу параметрів абонентських пристроїв різних виробників для моделі (5.36) можна записати так:

$$K_n^V = \begin{cases} \frac{(K \pm \Delta K)P_m + S_1 + \Delta S_1}{KP_m + S_1}, \\ \frac{(K_1 \pm \Delta K_1)P_m^2 + (K_2 \pm \Delta K_2)P_m + S_2 + \Delta S_2}{K_1P_m^2 + K_2P_m + S_2}, \end{cases} \quad (5.37)$$

Модель (5.37) дозволяє визначати фактор впливу приймально-передавального обладнання різноманітних пристроїв різних виробників при оцінюванні основних параметрів радіоканалу. Модель не залежить від довжини радіоканалу та враховує статистичний зв'язок.

Для оцінювання фактору впливу різноманітних пристроїв різних виробників на основні параметри радіоканалу, проведено математичні дослідження отриманих моделей (5.32) і (5.36) для середньостатистичних значень із врахуванням усереднення коефіцієнтів спадання та інтервалів Δa і Δb , а також варіацій початкових коефіцієнтів. Результати для виразу (5.32) наведено на рис. 5.25.

Як видно із отриманих результатів на рис. 5.25, Δa та Δb мають незначний вплив на результат оцінювання основних параметрів радіоканалу. Такі

коєфіцієнти мають більшу залежність від інших факторів впливу які можна поділити на дві групи.

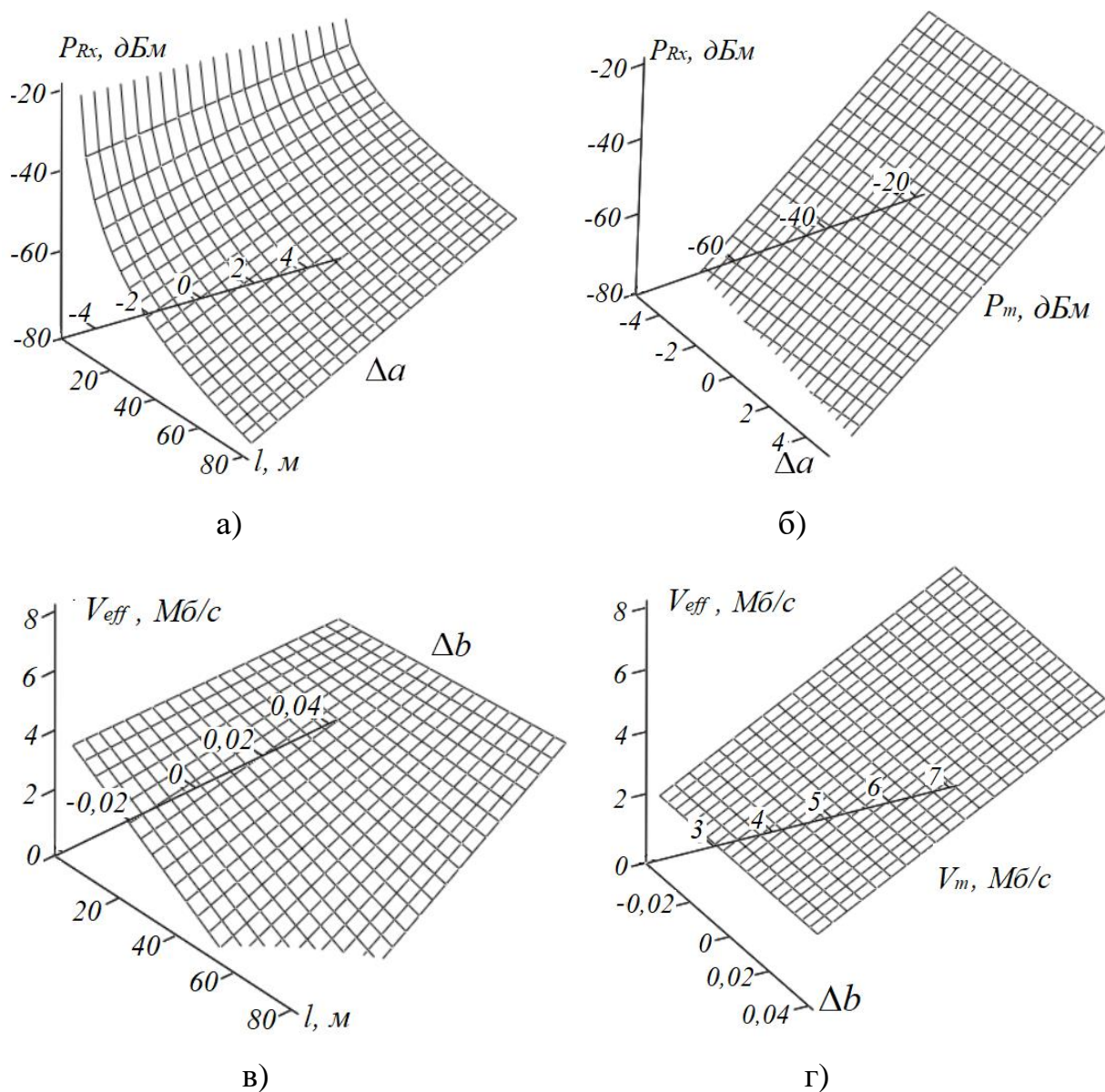


Рис. 5.25. Результати досліджень моделей (5.33) та (5.34) для: а – P_{Rx} , Δa та l ; б – P_{Rx} , Δa та P_m ; в – V_{eff} , Δb та l ; г – V_{eff} , Δb та V_m

Перша група енергетичних параметрів, які впливають на Δa , до якої можна віднести положення приймально-передавального обладнання в просторі, попадання пристрою в максимум або мінімум характеристик розподілу сигналу у приміщенні, параметри приймально-передавального тракту точок доступу та абонентських пристроїв (чутливість, характеристики антен, коефіцієнт підсилення

та інш.), багато-променеве поширення хвиль та ін. Але в більшості випадків відмінності у приймально-передавальному тракті пристроїв різних виробників можна оцінити на основі вимірювання параметра P_m в певній контрольній точці та оцінити по всій довжині радіоканалу безпосередньо для досліджуваного пристрою.

Інша група факторів – інформаційна (Δb), що впливає на ефективну швидкість передачі інформації. Тут виникає цікава ситуація, як поява фактору обмеження швидкості внутрішньої шини обміну даними пристроїв, що може показувати на низьку якість компонентної бази та програмного забезпечення. В результаті цього, лінійна регресія вносить значну похибку у результати оцінювання для ближніх і дальніх відстаней абонентського пристрою від ТД. Тому, в такому випадку, є доцільним застосовувати модель (5.37). Результати математичного моделювання для моделі (5.37), із врахуванням усереднених значень, наведено на рис. 5.26 (для квадратичної функції враховується ΔK_2).

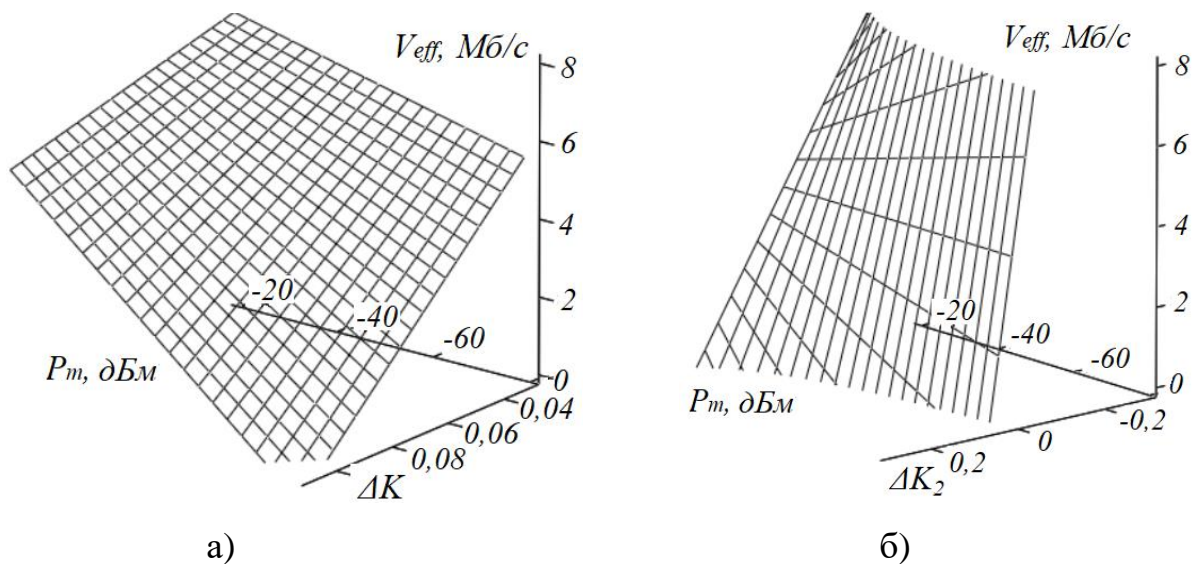


Рис. 5.26. Результати досліджень моделі (5.37) для: а – лінійної регресії; б – квадратичної регресії

Результати на рис. 5.26 підтверджують наявність вагомого фактору впливу, який буде давати похибку оцінювання ефективної швидкості передачі інформації

при використанні лінійної моделі для пристроїв із обмеженням внутрішньої шини ТД відносно абонентського пристрою.

Для отриманих коефіцієнтів регресій, що наведено у табл. 5.4 і 5.5 та на основі моделей (5.33), (5.34) і (5.37), отримуємо залежності показників впливу приймально-передавального обладнання різноманітних пристроїв різних виробників. Результати наведено на рис. 5.27 (позначення кривих відповідає рис. 5.24).

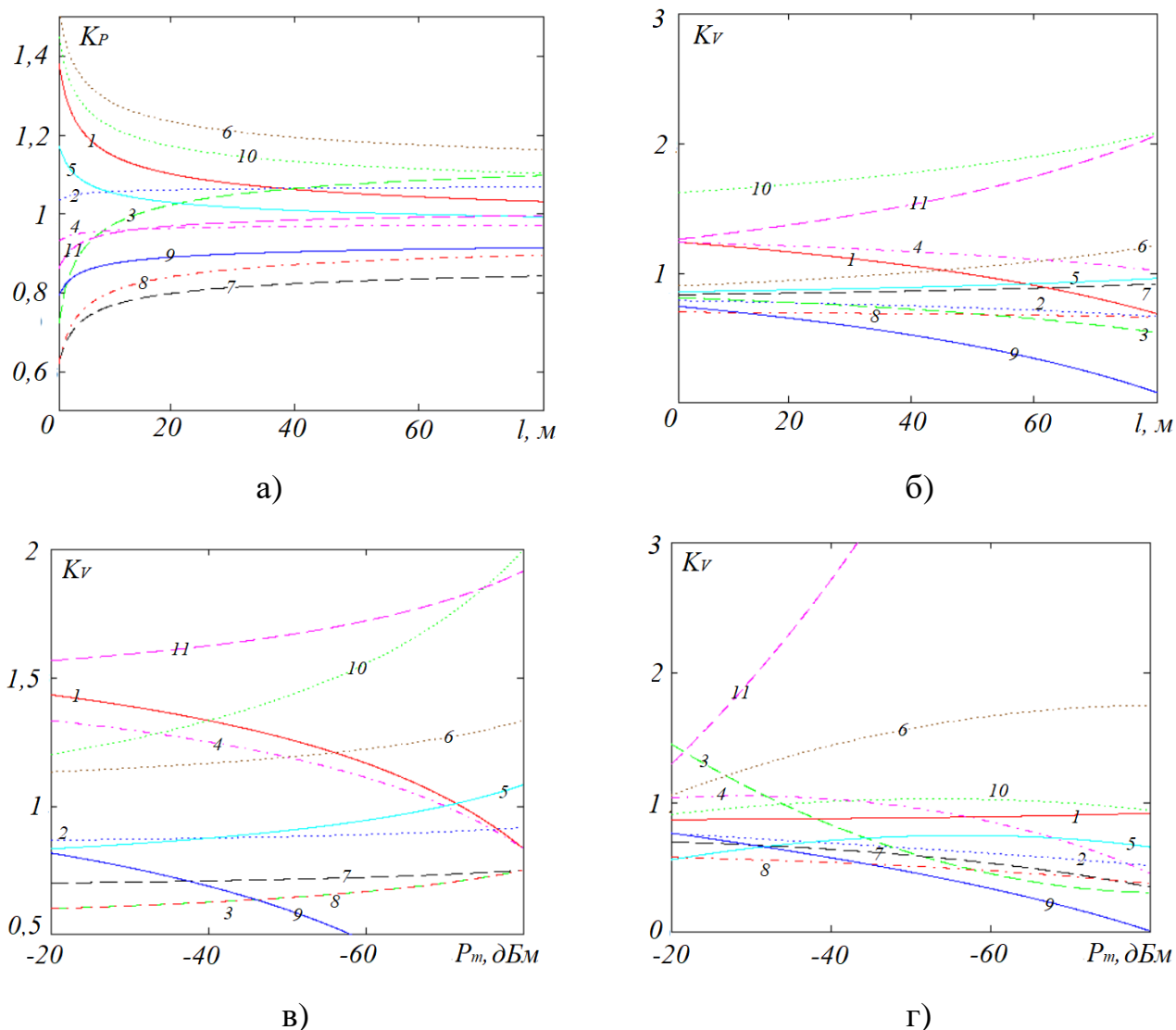


Рис. 5.27. Результати досліджень моделі показників впливу: а – енергетичного; б – інформаційного; в – лінійної моделі статистичного зв'язку; в – квадратичної моделі статистичного зв'язку

Аналіз результатів досліджень на рис. 5.27, показав, що не кожен пристрій різних виробників може використовуватись для знаходження параметрів моделей оцінювання основних параметрів радіоканалів, особливо пристрої із внутрішнім обмеженням пропускної здатності, оскільки в такому випадку похибка може досягати до 50% в межах середньостатистичних приміщень. Отримані результати є справедливими для етапів проектування мереж, але для оцінювання параметрів радіоканалів та гарантованої зони обслуговування, з точки зору індивідуального приймального пристрою, є несуттєвим.

Таким чином, отримані моделі показників впливу параметрів приймально-передавального обладнання різноманітних пристроїв різних виробників враховують довірчі інтервали коефіцієнтів затухання та варіації початкових значень моделей. Такі показники необхідно враховувати в моделях оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на базі радіодоступу 5G/Wi-Fi для підвищення достовірності кінцевого результату для більш точного визначення зони покриття та зони із мінімальними інформаційними втратами.

5.5 Дослідження впливу зовнішніх факторів на параметри радіоканалу

Дослідження фактору впливу розміру пакетів на ефективну швидкість передачі інформації. Мережі радіодоступу 5G/Wi-Fi є рівнем корпоративної телекомунікаційної мережі, який надає доступ до інформаційних ресурсів для абонентських пристроїв. Між прикладним рівнем мережі та каналним рівнем 5G/Wi-Fi, на підрівні керування логічним зв'язком (LLC), виконується формування сервісних кадрів даних MSDU на основі пакетів стеку TCP/IP [278]. Стек протоколів TCP/IP може формувати пакети різної довжини, щоб підлаштуватись під передачу повідомлень прикладних додатків. Довжина такого пакету, можна вважати, як інформаційних фактор, який впливає на

ефективну швидкість передачі інформації. Дослідимо таке явище на основі стандарту Wi-Fi.

Кадр 802.11 має фіксований розмір, що визначається за виразом (1.7) та в більшості випадків узгоджений із розміром пакету. Але додатки верхнього рівня можуть формувати пакети розміром до 65 535 байт, що передбачено протоколом IP. В такому випадку, каналний рівень буде розбивати великі пакети на частини, додаючи службову інформацію. Це передбачає зменшення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалі.

Дослідження фактору впливу довжини пакетів на ефективну швидкість передачі інформації було проведено на основі радіоканалу стандарту 802.11n використовуючи методику попередніх розділів. Використано прямий канал для передачі і зворотний канал для прийому повідомлень та додаток прикладного рівня, для формування пакетів різних розмірів: 1024, 4096, 6144, 8192, 16384 байт. Крім того, додатково в радіоканал водились інтерференційні завади.

Розглянемо залежності зміни ефективної швидкості передачі інформації у часі для довжини пакету, що не перевищує довжину кадру. Результати наведено на рис. 5.28.

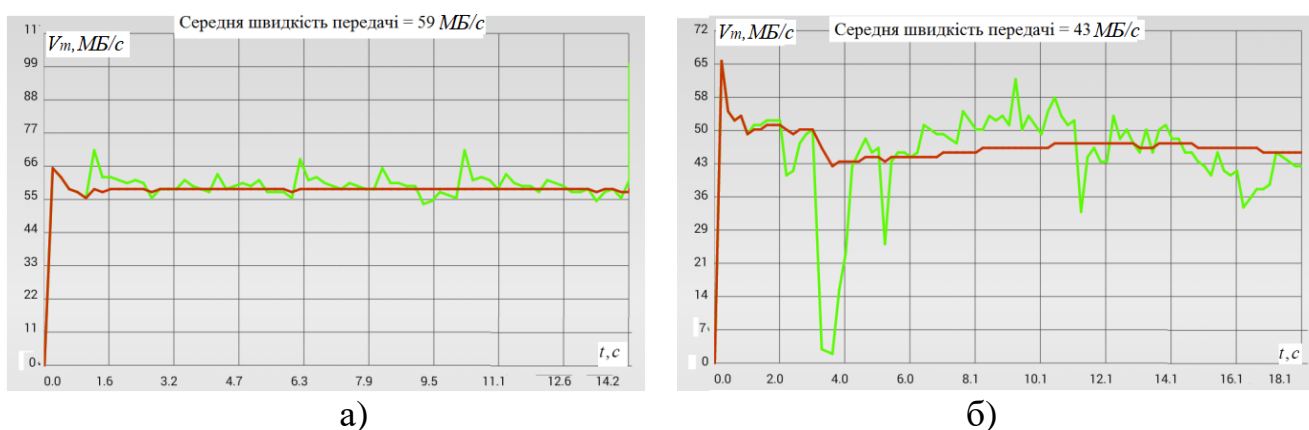
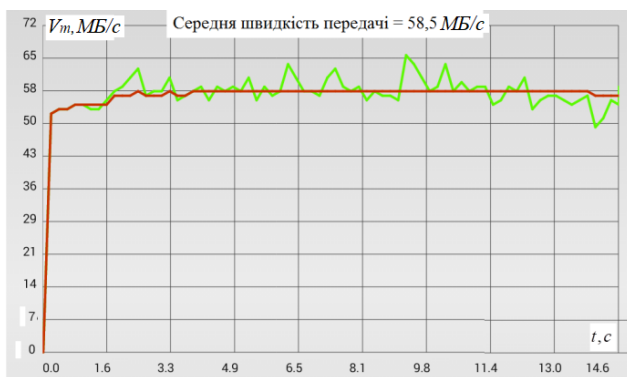


Рис. 5.28. Зміна ефективної швидкості передачі інформації у часі для пакетів розміром 1024 байт на відстані 1 м (а) та 16 м (б)

Як видно із графіків на рис. 5.28, при малій довжині радіоканалу, спостерігаються незначні флуктуації миттєвих значень ефективної швидкості

передачі інформації. Зі збільшенням довжини радіоканалу, флуктуації суттєво збільшуються. В зв'язку із схожим характером отриманих залежностей для інших розмірів повідомлень, розглянемо графіки тільки для 6144 байт та 16384 байт, які наведено на рис. 5.29 і рис. 5.30 відповідно.

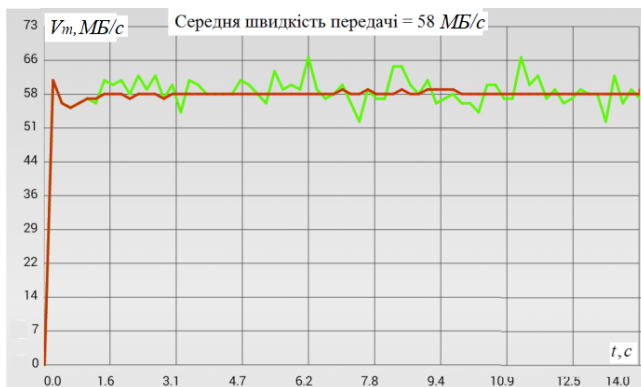


а)

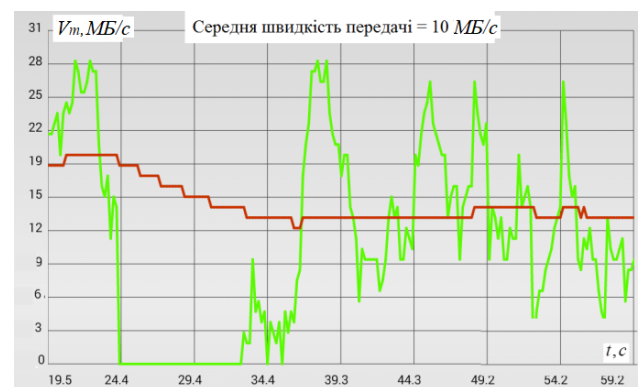


б)

Рис. 5.29. Зміна ефективної швидкості передачі інформації у часі для пакетів розміром 6144 байт на відстані 1 м (а) та 16 м (б)



а)



б)

Рис. 5.30. Зміна ефективної швидкості передачі інформації у часі для пакетів розміром 16384 байт на відстані 1 м (а) та 16 м (б)

Як видно із отриманих часових залежностей, більший розмір пакетів створює більші флуктуації ефективної швидкості передачі інформації. Починаючи із розміру пакету в 6144 байт, що перевищує розмір інформаційного поля стандарту 802.11 у три рази, для більшої довжини радіоканалу спостерігаються значні флуктуації та значне зменшення ефективної швидкості передачі інформації.

Особливо таку залежність помітно при довжинах радіоканалу понад 10 м. Це пояснюється виникненням великої кількості помилок у пакетах MSDU із-за зовнішніх завад, що приводить до значного збільшення службової інформації та кількості циклів повторної передачі кадру. Кількість циклів перезапиту в рамках одного повідомлення, яке розбите на декілька кадрів, зростає в рази.

Далі розглянемо дослідження для коротких радіоканалів із смугою 20 МГц. В даному випадку, додатково вносились інтерференційна завада, як вагомий фактор впливу на цикли передачі кадру. Результати наведено на рис. 5.31.

Як видно із графіків, найбільш оптимальним розміром пакетів є 4096 байт. Вище цього значення спостерігається значне зменшення ефективної швидкості передачі інформації. Крім того, при існуванні інтерференційних завад у радіоканалі, збільшується імовірність появи зон затухання приблизно у два рази. Особливо це спостерігається прояв для пакетів із великим розміром 16384 байт, як безпосередньо біля точки доступу, так і на відстані 16-ти метрів.

Далі розглянемо дослідження радіоканалу зі смугою 40 МГц. Результати наведено на рис. 5.32.

В такому випадку залежності ефективної швидкості передачі інформації мають кращу рівномірність, та меншу залежність від завад, оскільки перехід на радіоканал із більшою смугою дає кращу стабільність від інтерференційних завад. Таким чином, під час проведених досліджень було встановлено, що для підвищення інформаційної ефективності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, можливе використання пакетів не більше ніж 4096 байт, як для радіоканалу зі смугою 20 МГц, так і зі смугою 40 МГц.

При існуванні інтерференційних завад у середовищі передачі, для радіоканалу зі смугою 40 МГц, падіння ефективної швидкості передачі інформації для пакетів розміром більшим за 4096 байт, становить не більше 2 раз, на відміну від смуги 20 МГц, де падіння, в деяких випадках, становило більше 4-х раз.

Дослідження фактору впливу мобільності абонентів у мережах. Корпоративні телекомунікаційні мережі на основі стандартів 5G/Wi-Fi в першу чергу передбачають мобільність абонентів. Тоді, при здійсненні руху

абонентського пристрою у межах покриття мережі у приміщенні, на ефективну швидкість передачі інформації буде впливати ефект Доплера та зміщення картини максимумів і мінімумів за рахунок зниження рівня ортогональності у сигналах OFDM із-за ефекту багатопроменевого поширення хвиль [278].

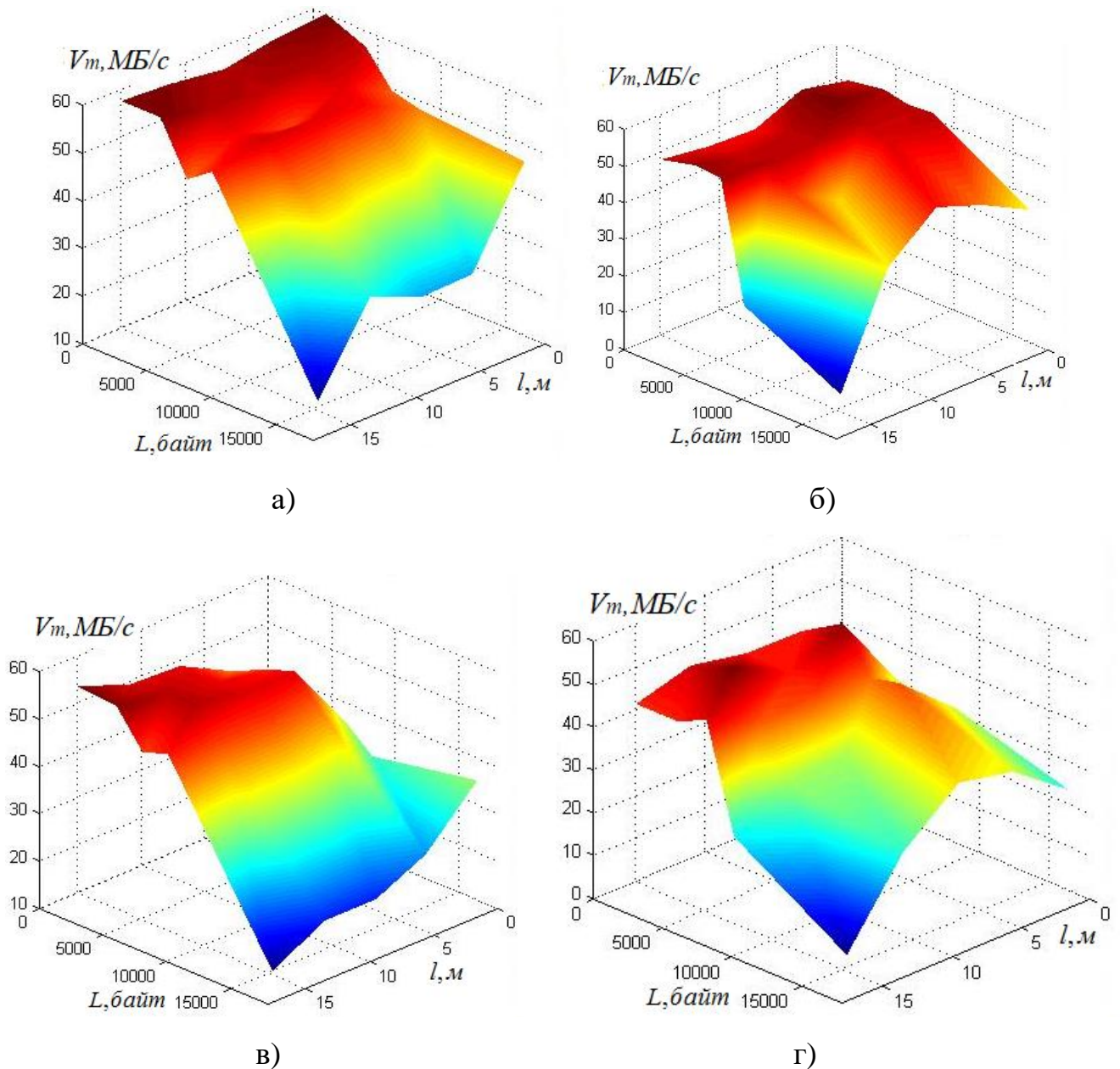


Рис. 5.31. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу смугою 20 МГц та розміру пакетів для: прямого каналу без завад (а); прямого каналу із завадами (б); зворотного каналу без завад (в); зворотного каналу із завадами (г)

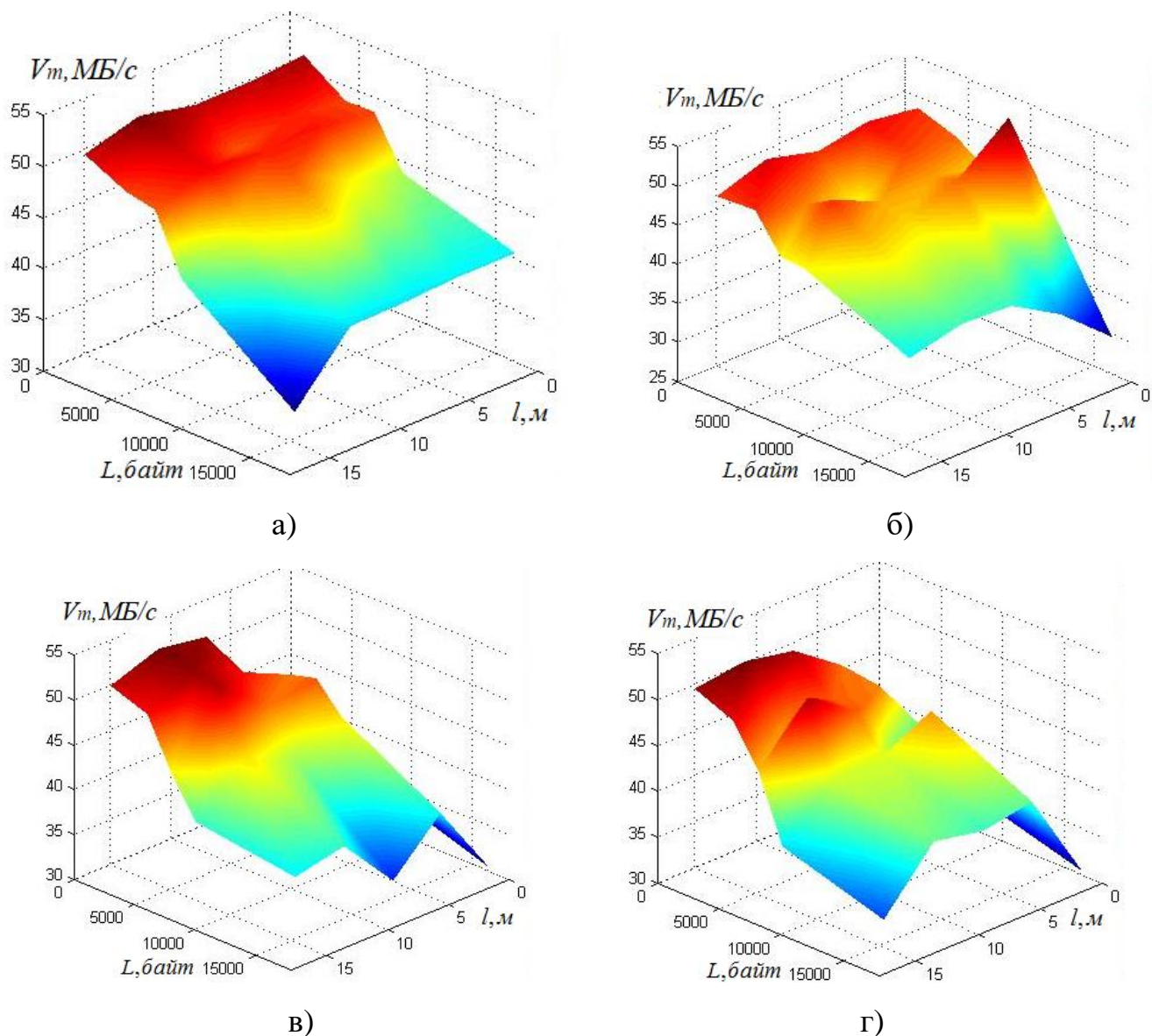


Рис. 5.32. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу смугою 40 МГц та розміру пакетів для: прямого каналу без завад (а); прямого каналу із завадами (б); зворотного каналу без завад (в); зворотного каналу із завадами (г)

Тоді, можна звернути увагу на втрати, що пов'язані із можливою мобільністю абонентів. В такому випадку, на вході рухомого приймального пристрою, спостерігаються явища повільної зміни потужності сигналу, що залежить від положення у просторі, та швидкої зміни, що залежить від часу та швидкості руху. Саме швидка зміна потужності сигналу буде визначати фактор впливу мобільності абонентів від ефекту доплерівського зміщення частоти.

Такий фактор впливу є характерним для системи що використовують OFDM модуляцію, до яких належать мережі побудовані із використанням стандартів 5G/Wi-Fi [214]. Оскільки, для більшості абонентів є характерним переміщення у просторі відносно точки доступу, то враховуючи довжину хвилі, що становить близько 12 см для 2,4 ГГц і 5...6 см для 5ГГц, можна припустити високу імовірність виникнення значних змін характеристик основних параметрів радіоканалу.

В загальному випадку, для радіоканалу, доплерівське зміщення частоти залежить від двох параметрів [279]: носійної частоти та швидкості руху. Величина доплерівського зсуву частоти на вході приймача буде змінною для різних кутів прийому. Цей ефект має незначний вплив на системи передачі із вузько-спрямованими антенами, але для стандартів 5G/Wi-Fi, найбільш поширеним є використання всеспрямованих антен, де максимальне доплерівське зміщення частоти, для носійних в діапазоні частот 3..60 ГГц та швидкості руху приймача 3..350 км/год, буде знаходитись в діапазоні 10 Гц...20 кГц.

Враховуючи побудову радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж як «точка доступу – абонент», при яких є рухомими як передавачі так і приймачі, то доплерівське зміщення частоти можна записати як [280]:

$$f = f_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c} \cos \phi}, \quad (5.38)$$

де f – змінена частота носійної сигналу; f_0 – початкова частота носійної сигналу; c – швидкість світла; v – швидкість передавача відносно приймача сигналу; ϕ – кут між напрямком випромінювання сигналу і напрямком руху передавача.

Як видно із наведеної формули, доплерівське зміщення частоти буде мати найбільше значення під час паралельної складової руху, коли абонент віддаляється або наближається відносно точки доступу. В такому випадку,

можливе виконання наступних умов: $\phi \rightarrow 0$ або $\phi \rightarrow 180^0$, та $v \ll c$. Змінена частота сигналу запишеться так [280]:

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \phi\right). \quad (5.39)$$

Якщо приймальний пристрій буде рухатись по колу і матиме тангенціальне прискорення, існує імовірність виникнення ситуації, при якій напрям випромінювання хвилі та напрямок руху абонентів знаходяться під кутом 90^0 , і вираз (5.39) набуде наступного вигляду [280]:

$$f \approx f_0 \left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right). \quad (5.40)$$

Ефект Допплера вносить, як правило, негативний вплив на параметри радіоканалу, і як наслідок виникають помилки при передачі інформації.

Мобільність абонентських пристроїв при застосуванні технології МІМО можна врахувати на основі математичної моделі імпульсної характеристики фільтра, в якій присутні параметри просторового положення і коефіцієнту відбиття, яку можна записати так [281]:

$$h(t, \tau, d) = \sum_{i=1}^N k_i(d) \delta(1 - \tau_i) \exp(j2\pi f_n(t\zeta_i - \tau_i)), \quad (5.41)$$

де N – кількість передавачів та приймачів при використанні МІМО; t – координата часу; d – просторова координата; k – коефіцієнт послаблення сигналу; τ – час затримки сигналу у середовищі; ζ – коефіцієнт доплерівського зміщення частоти сигналу; $\delta(t)$ – дельта-імпульсна характеристика.

Технологія МІМО дозволяє значно зменшити появу помилок під час сеансів передачі кадрів у радіоканалі, але виключити вплив доплерівського зміщення частоти є практично неможливим.

Для перевірки наведених тверджень, дослідимо фактор впливу мобільності абонентів на ефективну швидкість передачі інформації на основі радіоканалу стандарту 802.11n у приміщенні з розмірами $l=17$ м та $d=16$ м, як показано на рис. 5.33.

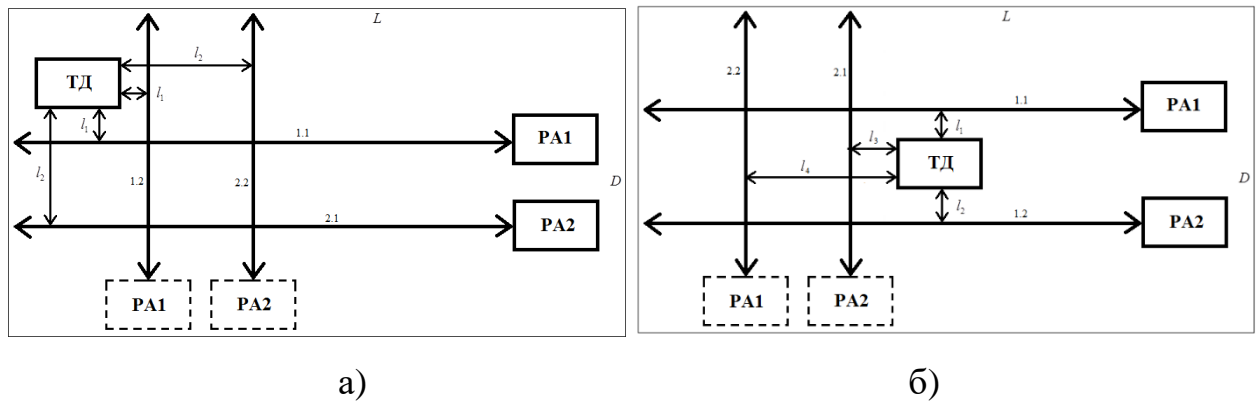


Рис. 5.33. Схема для досліджень фактору впливу мобільності абонентів: а – для кутового положення ТД; б) для центрального положення ТД

У приміщенні використовувалось кутове та центральне положення точки доступу (ТД) і два рухомі абонентські пристрої ПА1 та ПА2. Для кожного абонента створено відповідні маршрути руху: для кутового положення ТД – маршрути 1.1 і 1.2 на відстані $l_1=0$ м від ТД та маршрути 2.1 і 2.2 на відстані $l_2=3$ м від ТД; для центрального положення ТД – маршрути 1.1 і 1.2 на відстані $l_1=l_2\approx 1,5$ м від ТД та маршрути 2.1 і 2.2 на відстані $l_3\approx 0$ м і $l_4\approx 3$ м від ТД.

Основним критерієм для досліджень є вимірювальне значення ефективної швидкості передачі інформації V_m , оскільки результати для параметра P_m мають схожий характер із результатами у розділі 2. Параметр V_m оцінювався як середнє значення за час проходження абонентом повної відстані встановлених маршрутів із відповідною швидкістю руху. Ще одним врахованим фактором є технологія МІМО у ТД, яка повинна забезпечувати покращення характеристик радіоканалу в умовах руху абонентів у просторі [282]. В результаті цього, було запропоновано проводити дослідження із застосуванням однієї, двох та трьох випромінюючих антен.

Розглянемо існування одного рухомого абонента у мережі при стаціонарному розміщенні іншого. Тоді, для кутового положення ТД у приміщенні, результати досліджень наведено на рис. 5.34.

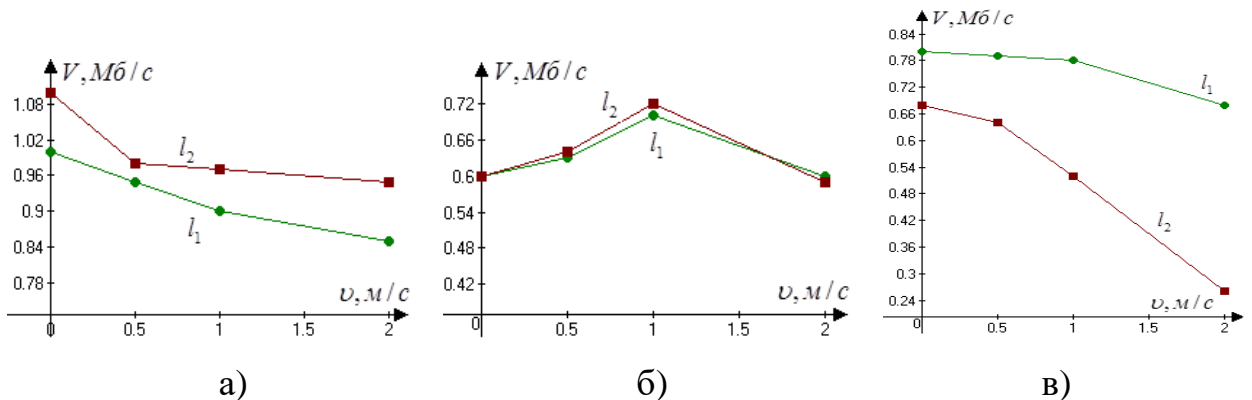


Рис. 5.34. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для одного абонента та кутового положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

Як видно із графіків на рис. 5.34, для кутового положення ТД спостерігається падіння ефективної швидкості передачі інформації від збільшення швидкості руху абонента. Найбільший вплив ефекту Доплера спостерігається при використанні однієї антени. Встановлено, що незначне зменшення ефективної швидкості передачі інформації, для однієї і двох антен, виникає внаслідок обмеження сумарної потужності випромінювання ТД, що становить не більше 100 мВт для n -кількості випромінювачів.

Результати досліджень для центрального положення ТД наведено на рис. 5.35.

Як видно із графіків на рис. 5.35, для центрального положення ТД спостерігається падіння ефективної швидкості передачі інформації від збільшення швидкості руху абонента при використанні трьох та однієї антени.

Відносно впливу ефекту Доплера, то на основі отриманих результатів досліджень встановлено, що для двох антен передавальна характеристика зростає зі збільшенням швидкості руху, що є повною протилежністю для випадків із однією та трьома антенами. Тут також характерне зменшення ефективної

швидкості передачі інформації, що виникає внаслідок обмеження сумарної потужності випромінювання ТД, але має меншу різницю між максимумами та мінімумами за рахунок створення кращого покриття у приміщенні.

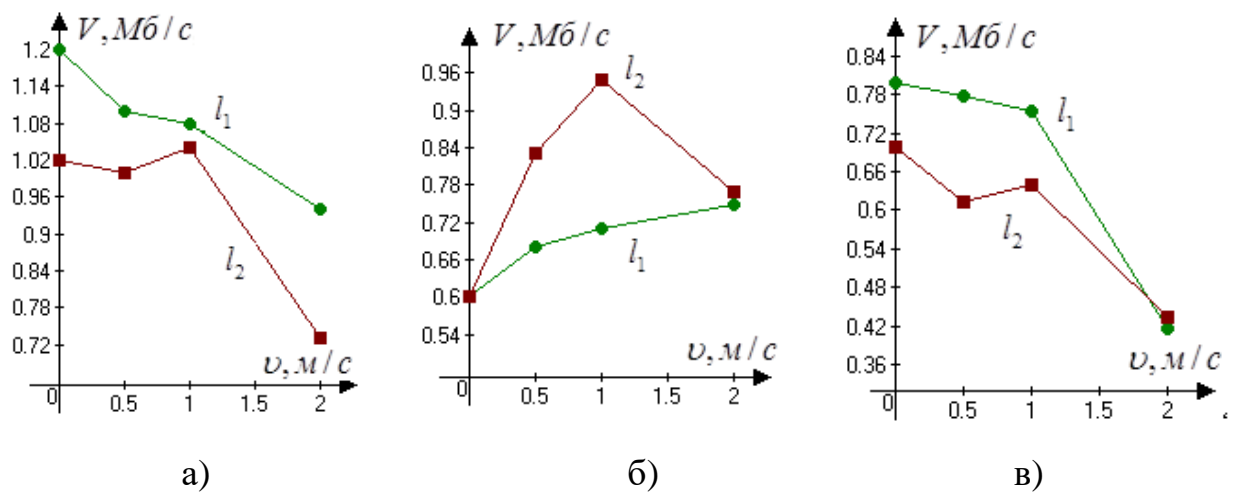


Рис. 5.35. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для одного абонента та центрального положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

Далі розглянемо типові випадки для можливих напрямків руху абонентів у приміщенні на основі маршрутів 1,1 і 2,1, що являють собою: зустрічний рух, протилежно-напрявлений рух, паралельний рух. Результати досліджень для кутового положення наведено на рис. 5.36, рис. 5.37 та рис. 5.38 відповідно.

Результати досліджень для центрального положення наведено на рис. 5.39, рис. 5.40 та рис. 5.41 відповідно.

Останній випадок – перпендикулярний рух для двох абонентів, так як на даному етапі можна припустити, що існує імовірність появи руху абонентів із тангенційним прискоренням, при якому доплерівське зміщення частот буде мати мінімальне значення. Це передбачає використання маршрутів, для руху абонентів, розташованих під кутом 90° один до одного, як показано на рис. 5.33.

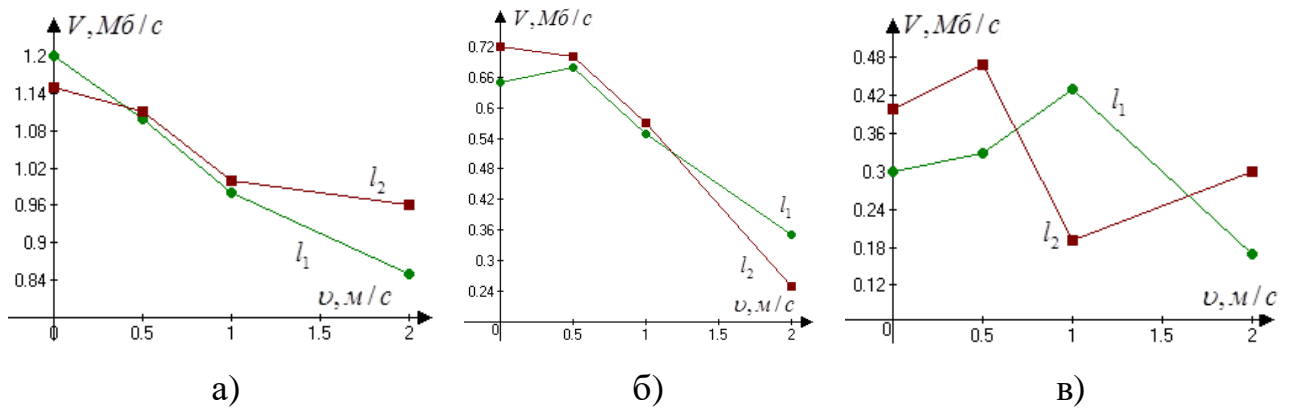


Рис. 5.36. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для зустрічного руху двох абонентів та кутового положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

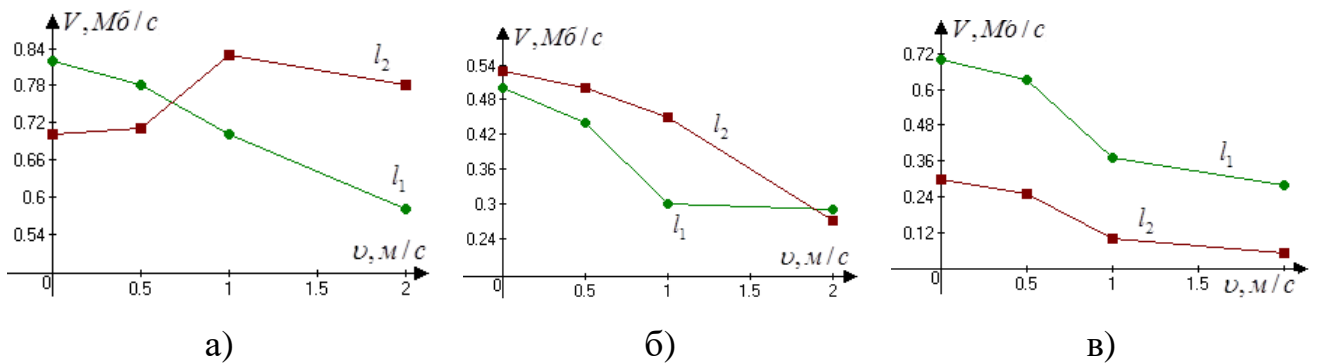


Рис. 5.37. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для протилежно-напрявленого руху двох абонентів та кутового положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

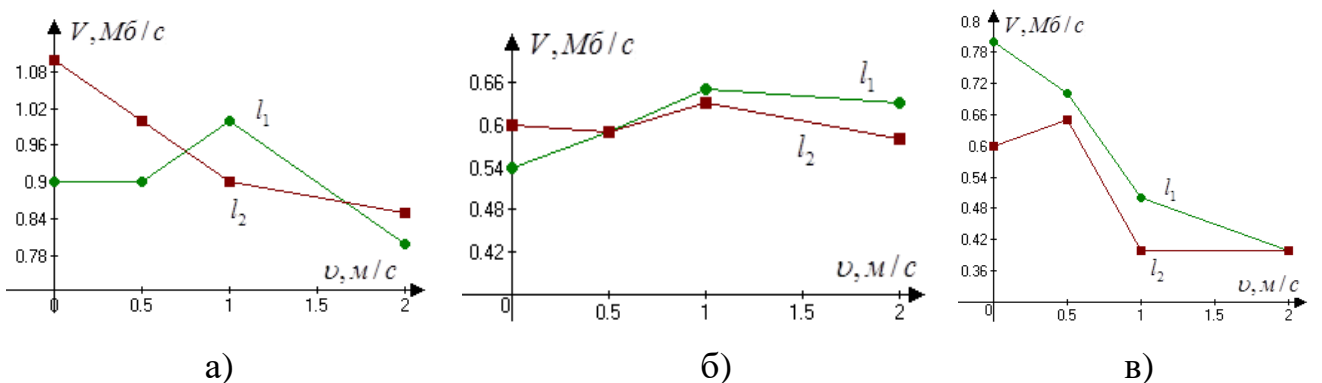


Рис. 5.38. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для паралельного руху двох абонентів та кутового положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

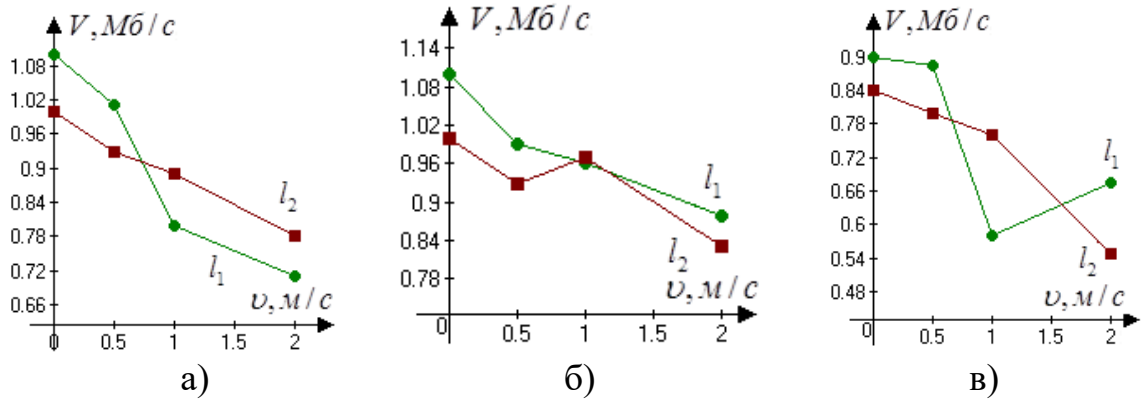


Рис. 5.39. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для зустрічного руху двох абонентів та центрального положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

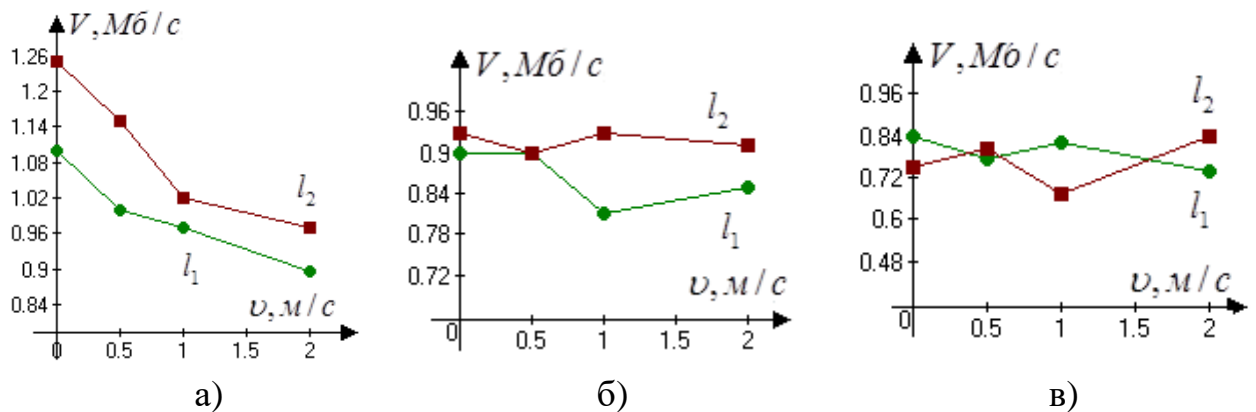


Рис. 5.40. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для протилежно-напрявленого руху двох абонентів та центрального положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

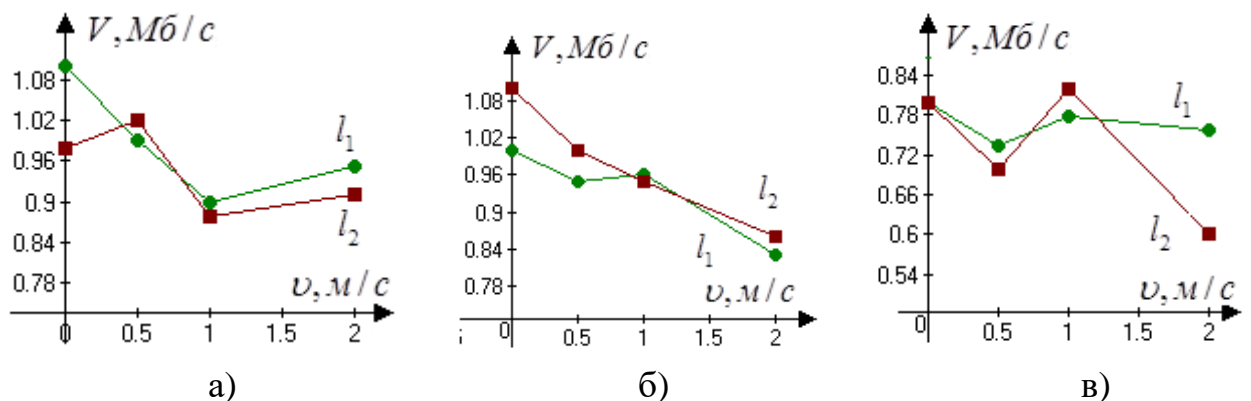


Рис. 5.41. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для паралельного руху двох абонентів та центрального положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

Результати досліджень для кутового та центрального положень ТД наведено на рис. 5.42 та рис. 5.43 відповідно.

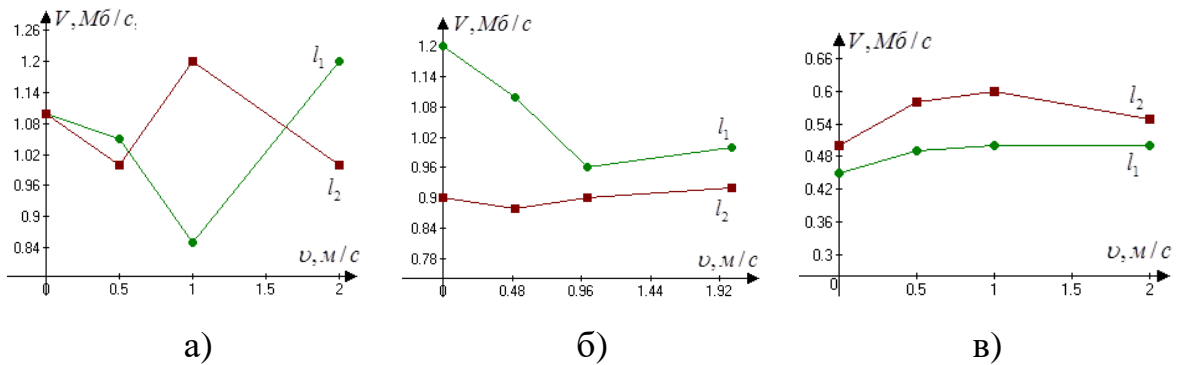


Рис. 5.42. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для перпендикулярного руху двох абонентів та кутового положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

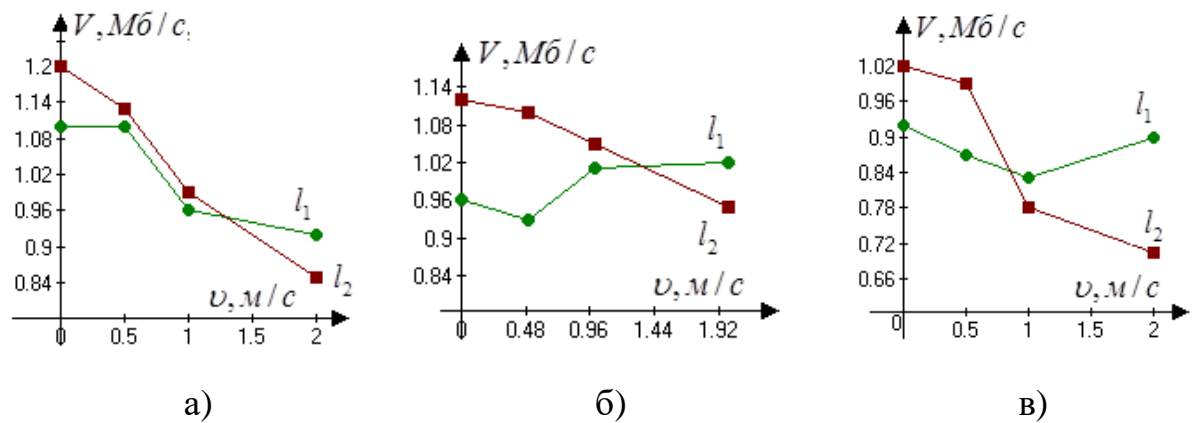


Рис. 5.43. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху для перпендикулярного руху двох абонентів та центрального положення ТД, при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

Отже, на основі аналізу експериментальних досліджень для кутового та центрального положення ТД, встановлено, що зміна ефективної швидкості передачі інформації починає спостерігатись при збільшенні швидкості руху абонента від 0,5 м/с і вище. Враховуючи різницю та характер спаду кривих l_1 та l_2 , можна стверджувати, що існує прямий зв'язок багатопроменевого поширення

хвиль у приміщенні із появою ефекту Доплера для рухомих абонентів у зоні покриття мережі.

При використанні технології МІМО, підвищується стабільність параметрів радіоканалу при передачі інформації, але сумарна потужність випромінювання передавальних антен становить не більше 100 мВт. При швидкостях руху абонентів 1 м/с спостерігається значне зменшення параметра ефективної швидкості передачі інформації, а при двох і більше – падіння досягає у 1,5..2 рази. Крім того, встановлено, що будь-яке переміщення приймально-передавального обладнання у просторі вносить суттєвий вплив на ефективну швидкість передачі інформації у радіоканалі, але використання центрального положення ТД буде оптимальним варіантом для забезпечення максимальної ефективності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Дослідження фактору впливу несиметричності випромінювання точки доступу. На основі експериментальних досліджень у розділах 1 і 2, встановлено, що поширення хвиль, для корпоративних телекомунікаційних мереж є досить неоднорідним і залежить від багатьох факторів впливу. Починаючи із стандарту 802.11n та у 5G застосовується технологія МІМО, що передбачає використання масиву антен та додаткові технології підвищення рівня сигнал/шум. В такому випадку, існує можливість виникнення нерівномірності у діаграмах спрямованості антенних систем, що також можна назвати як фактор впливу. Дослідження такого фактору впливу було проведено для випадків кутового (МВ1) та центрального (МВ2) положення точки доступу у приміщенні за лініями вимірювання ЛВ1 і ЛВ2 на основі стандарту Wi-Fi. Спрощений варіант структури для досліджень наведено на рис. 5.44.

Результати досліджень при використанні однієї випромінюючої антени ТД, наведено на рис. 5.45.

Як видно із рис. 5.45, має місце значне затухання сигналу для абонентського пристрою на відстані l_2 , який знаходився біля ТД до 2 м, при кутовому положенні.

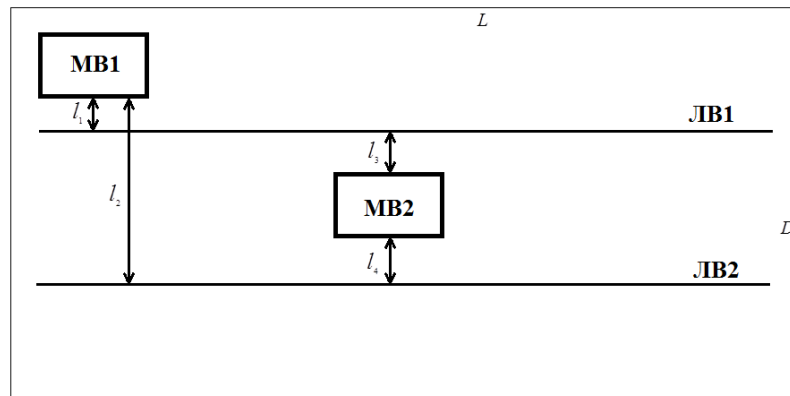


Рис. 5.44. Схема досліджень фактору впливу несиметричності випромінювання

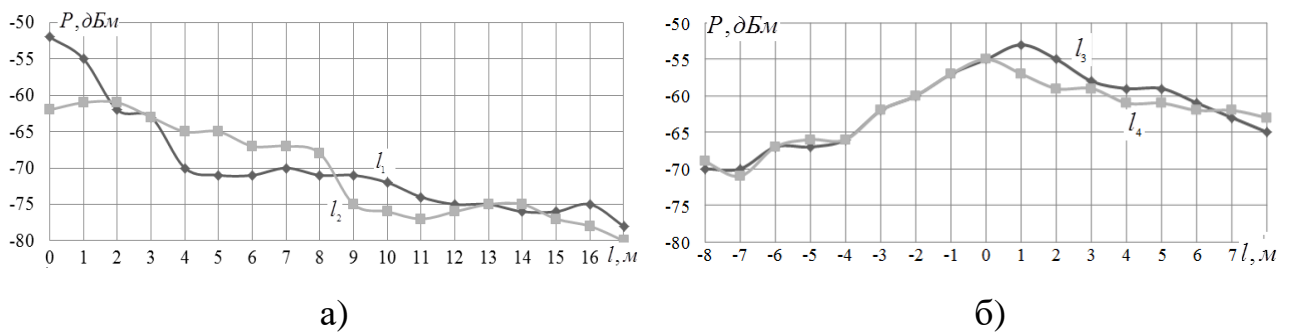


Рис. 5.45. Залежність потужності сигналу від відстані при використанні однієї антени для кутового положення ТД (а) та центрального (б)

Графіки показують існування флуктуацій та дію незначних факторів впливу у приміщенні, які раніше розглядались у попередніх розділах. Для центрального положення ТД у МВ2, затухання сигналу має аналогічний характер, але спостерігається незначне зміщення максимуму випромінювання для абонентського пристрою на відстані l_3 за лініями вимірювання ЛВ1 і ЛВ2.

Результати досліджень потужності сигналу по лініях вимірювання при використанні двох випромінюючих антен у ТД наведено на рис. 5.46.

В такому випадку, на рис. 5.46 (а), дві випромінюючі антени ТД створюють складну картину поширення хвиль у приміщенні та значні флуктуації із відхиленням до 5 дБм. Для центрального положення ТД, для пристрою із розміщенням l_4 спостерігається зміщення максимуму випромінювання до 2 м.

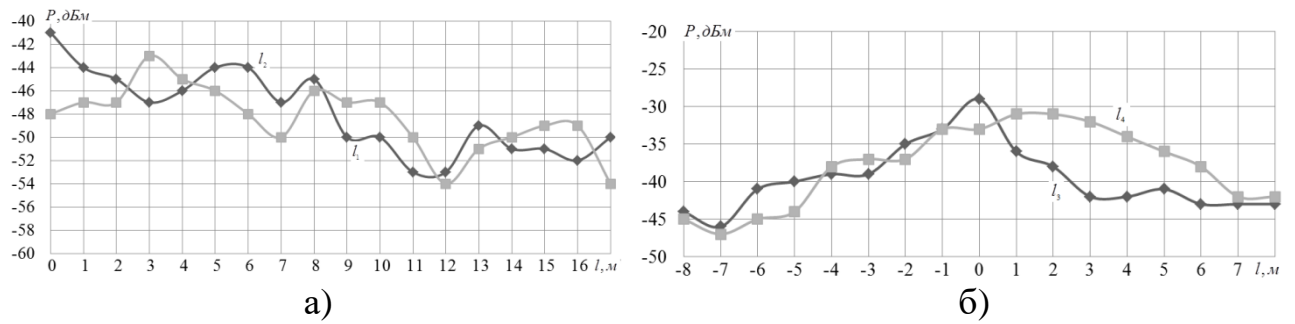


Рис. 5.46. Залежність потужності сигналу від відстані при використанні двох антен для кутового положення ТД (а) та центрального (б)

Результати досліджень при використанні трьох антен ТД наведено на рис. 5.47.

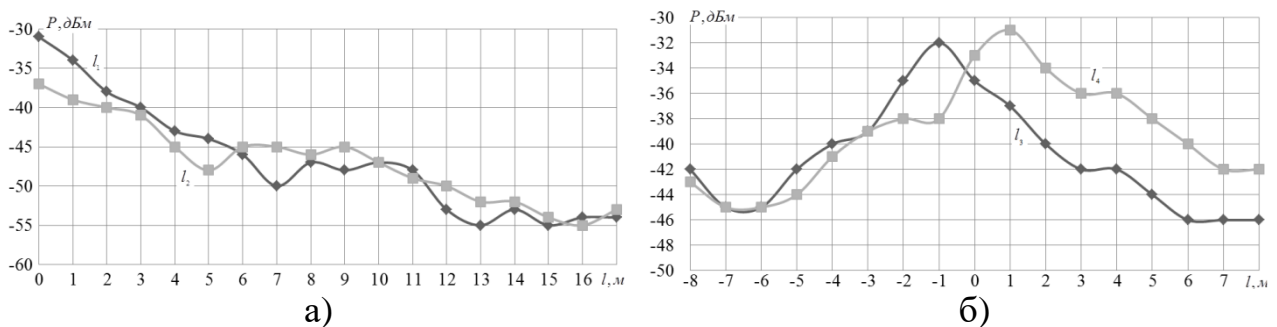


Рис. 5.47. Залежність потужності сигналу від відстані при використанні трьох антен для кутового положення ТД (а) та центрального (б)

При використанні трьох антен ТД отримано найкращі результати для кутового положення, де спостерігається майже лінійне згасання по всій довжині радіоканалу та флуктуації в допустимих межах. Найбільш цікавим є результати для центрального положення ТД. Тут чітко видно присутність максимумів випромінювання на отриманих залежностях потужності сигналу, відстань між якими становить 2 м, для двох ліній вимірювання при відстанях l_3 і l_4 від точки доступу.

Таким чином, результати експериментальних досліджень показують, що існує фактор впливу несиметричності випромінювання точки доступу при використанні масиву антен. Такий фактор може вносити похибку при

використанні моделей оцінювання основних параметрів радіоканалів стандартів 5G/Wi-Fi, оскільки центр координат може зміщуватись на 1 м під час вимірювання параметра P_m . Встановлено, що з точки зору отримання кращих енергетичних параметрів, найбільш оптимальним положенням точки доступу є центр приміщення, як при використанні однієї антени, так і для досягнення максимальної ефективності від технології MIMO.

Дослідження фактору впливу роумінгу у корпоративних телекомунікаційних мережах. Для розширення покриття корпоративних телекомунікаційних мереж застосовують додаткові точки доступу із мостовим з'єднанням, ретранслятори, mesh-мережі та ін. Особливістю цього є створення покриття із серії базових пристроїв до яких підключаються абоненти. Відповідно пересування абонента в мережі супроводжується перепідключенням з однієї точки доступу до іншої із більшим сигналом випромінювання (роумінг). Більшість розробників обладнання застосовують різні методи для того, щоб для абоненту роумінг був непомітний. Але, як правило, такий процес може мати і недоліки, що можна вважати як прояв фактору впливу із-за недосконалості технології.

При проектуванні корпоративних телекомунікаційних мереж, які мають більше однієї точки доступу або ретранслятори, головним критерієм є забезпечення стабільного сигналу по всій зоні покриття для мінімізації інформаційних втрат. При цьому, виконуються наступні умови: зони покриття повинні перекриватись, точки доступу належать до однієї мережі із унікальним ідентифікатором (SSID), використовуються однакові радіоканали передачі. Під час виконання механізму перемикання абонента між точками доступу втрати пакетів, під час сеансів передачі інформації, повинні бути мінімальні або зовсім відсутні. Для дослідження процесу перемикання рухомих абонентів між точками доступу, було створено мережу стандарту Wi-Fi, як показано на рис. 5.48.

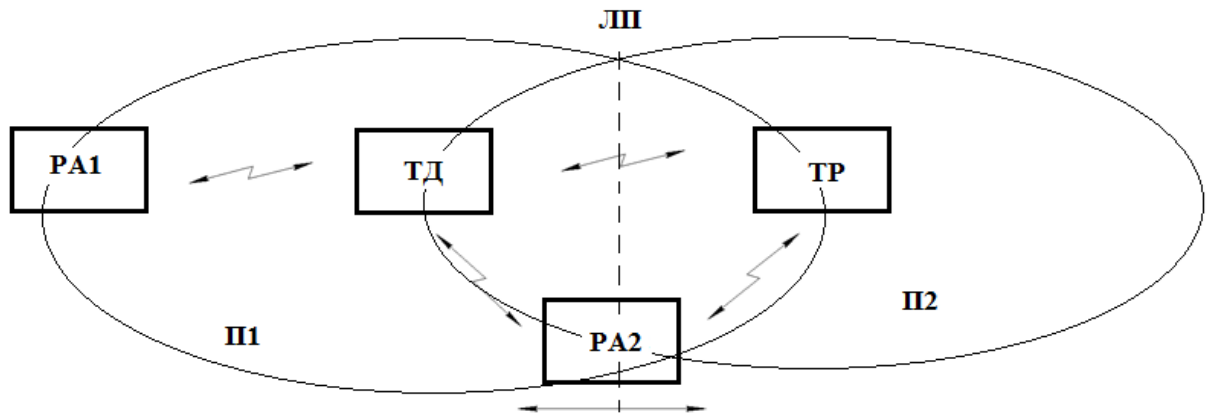


Рис. 5.48. Схема досліджуваної мережі

Наведена схема мережі містить точку доступу (ТД) із покриттям П1, точку ретранслятора (ТР) із покриттям П2, що виконує функцію розширення зони покриття мережі, два рухомих абонента РА1 і РА2 та умовну лінію перемикання (ЛП).

Основним параметром для досліджень обрано ефективну швидкість передачі інформації, яка безпосередньо пов'язана із потужністю сигналу на вході приймача рухомого абонента. Часові залежності потужності прийнятого сигналу під час руху РА2 через ЛП між точками ТД і ТР наведено на рис. 5.49.

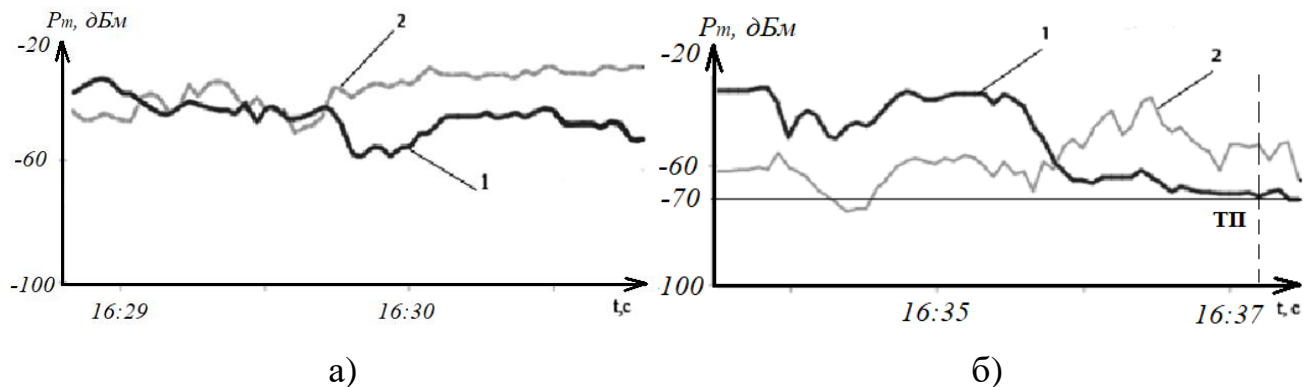
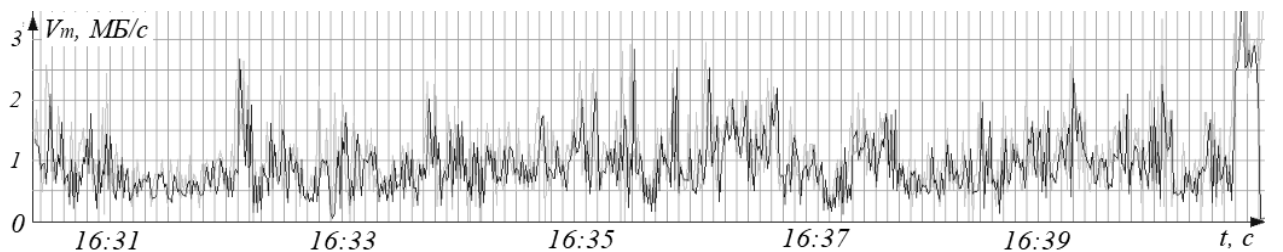


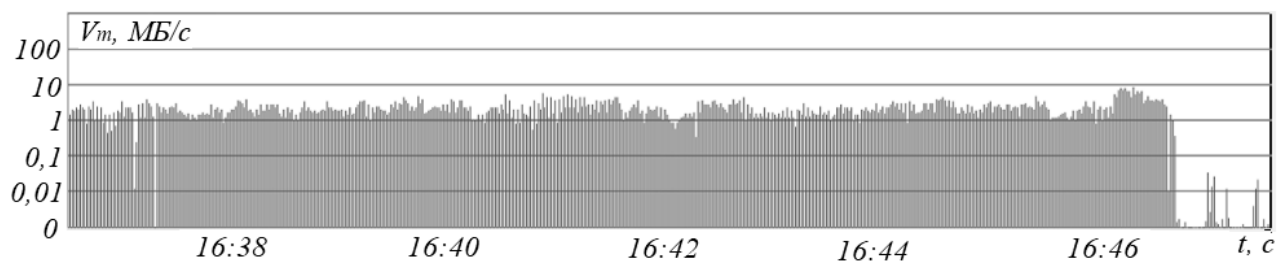
Рис. 5.49. Часові залежності потужності сигналу у мережі: а – під час руху до ЛП; б – в момент перемикання

Як видно із рис. 5.49, під час руху абонента від ТД (крива 1) до ТР (крива 2) спостерігається аналогічні залежності сигналу від відстані, які були досліджена у розділі 2. Але? якщо рівень потужності від ТД зменшується до рівня -70 дБм, то

виконується автоматичне перемикання абонентського пристрою до ТР. Це явище показано як точка перемикання (ТП). Оскільки, виконується процес перемикання між точками доступу, то в такому випадку повинні виникати затримки при передачі інформації, або навіть втрати. Для підтвердження цього, проведено передачу звичайного трафіку від РА1 до РА2 та мультимедійного в зворотному напрямку. Часові залежності ефективної швидкості передачі інформації для створеного тракту між абонентами, наведено на рис. 5.50.



а)



б)

Рис. 5.50. Часові залежності ефективної швидкості передачі інформації для: а – передачі звичайного трафіку; б – передачі мультимедійного трафіку

Як видно із отриманих результатів досліджень на рис. 5.50, в момент часу перемикання, після 37-ї секунди, суттєво зменшилась ефективна швидкість передачі інформації, що зумовлено спрацюванням алгоритму ідентифікації абонента в точці ТР. Більш критична ситуація із мультимедійним трафіком, де чітко видно розрив потоку, та поява втрат корисної інформації із виникнення візуальних спотворень.

Враховуючи мобільність абонентів у корпоративних телекомунікаційних мережах, досліджено найбільш типові випадки роумінгу: абоненти рухаються

паралельно один одному, абоненти рухаються на зустріч один одному. Часові залежності ефективної швидкості передачі інформації між абонентами показано на рис. 5.51.

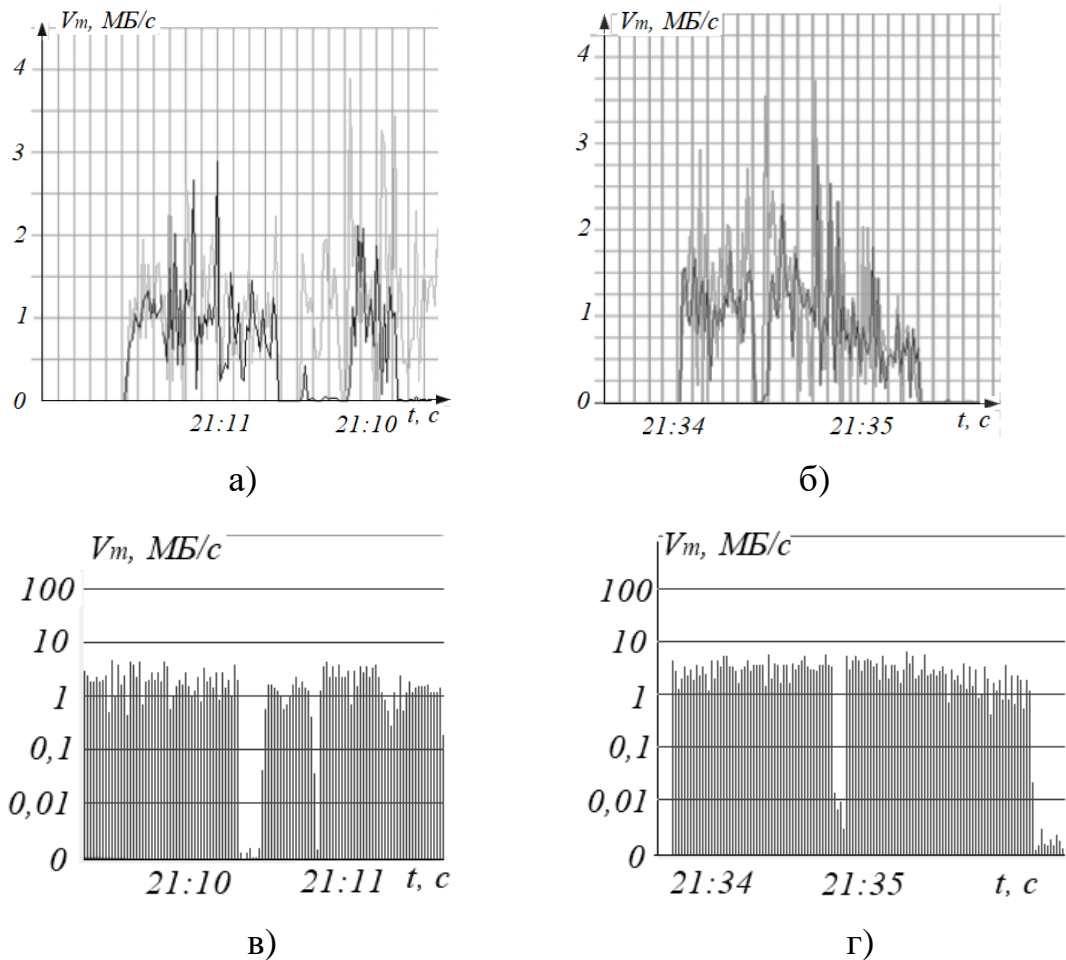


Рис. 5.51. Передача трафіку між абонентами: а – для звичайного трафіку та паралельного переходу; б – для звичайного трафіку та зустрічного переходу; в – для мультимедійного трафіку та паралельного переходу; г – для мультимедійного трафіку та зустрічного переходу

На основі аналізу отриманих результатів встановлено, що найбільш критичним для передачі інформації є випадок паралельного руху абонентів. В такій ситуації з'єднання може втрачатись на період до 0,5 секунд. У випадку зустрічного руху, результати є подібними до попередніх досліджень із одним абонентом.

Таким чином, режим автоматичного перемикання між точками доступу у корпоративних телекомунікаційних мережах, має недоліки, які особливо проявляють себе при передачі мультимедійного трафіку в режимі реального часу. Якщо для трафіку невеликих об'ємів, такий недолік є несуттєвим, то при передачі великого обсягу інформації, при врахуванні ряду недоліків, таких як зовнішні електромагнітні завади, відсутність дуплексної передачі, що призводить до поділу пропускної здатності радіоканалу між кількістю абонентів, а також характеристики потоків трафіку, у яких характерні явища нерівномірності і самоподібності, що виникають на основі випадкових змін параметрів середовища передачі, втрати корисної інформації можуть бути суттєвими.

Висновки до розділу 5

У розділі, на основі теоретичних та експериментальних досліджень, досліджено дію найбільш вагомих факторів впливу на параметри та характеристики радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж.

В результаті проведених досліджень отримано наступні наукові та практичні результати.

1. Запропоновано узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах, на основі еталонних моделей середньостатистичних значень в межах покриття мереж радіодоступу, що дають можливість оцінювати дію факторів впливу на основні параметри радіоканалів, як окремо так і комплексно. Такі показники призначені для підвищення ефективності оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж як доповнення до розроблених методів.

2. На основі експериментальних досліджень, встановлено, що інтерференційні завади вносять значну вплив на параметри і характеристики радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж але діють по різному. Для параметра P_{Rx} існування таких завад приводить до незначного послаблення рівня сигналу, що збільшується відносно кількості активних абонентів. Для параметра

V_{eff} спостерігаються значні відхилення для різних моделей оцінювання із-за обмежень дозволеного частотного діапазону та механізму боротьби за фізичний ресурс між всіма активними пристроями, у зоні покриття мережі, які попадають у суміщений і сусідній інтерференційні канали. Але з загальному, різниця між моделями оцінювання ефективної швидкості передачі інформації виникає в певних значеннях коефіцієнтів спадання та початкових рівнів.

3. На основі експериментальних досліджень встановлено, що вплив архітектурних перешкод на основні параметри радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж залежить від ефекту багатопроменевого поширення хвиль, що збільшується від кількості об'єктів у приміщенні, а також густини, товщини та кількості перешкод.

4. На основі експериментальних досліджень встановлено, що основна різниця між різними приймальними пристроями буде визначатись початковими рівнями моделей оцінювання основних параметрів радіоканалу та існуванням граничної межі параметра потужності сигналу на вході приймача, нижче якої ефективна швидкість передачі інформації має значний коефіцієнт спадання і має відхилення для пристроїв різних виробників. На усереднене граничне значення потужності сигналу на вході приймача має вплив кількість одночасно активних радіоканалів у мережі. Встановлено, що не кожен приймальний пристрій різних виробників може використовуватись для знаходження параметрів моделей оцінювання основних параметрів радіоканалів, особливо пристрої із внутрішнім обмеженням пропускної здатності, оскільки в такому випадку похибка може досягати до 50% в межах середньостатистичних приміщень.

5. На основі експериментальних досліджень встановлено, що фактори впливу розміру пакетів, мобільності абонентів, несиметричності випромінювання та роумінгу також мають вплив на результати оцінювання. Такі фактори додатково вносять похибку, але мають менші рівні впливу. До менш вагомих, можна віднести фактори, які розглянуто у наступних роботах: режим багатоспрямованої передачі [119]; передача мультимедійного трафіку без втрат [106]; додаткова

керуюча інформація у радіоканалі [118]; параметри алгоритмів моніторингу [128]; фактор впливу положення антен у просторі [141] і ін.

6. Отримано рекомендації для оцінювання параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж в умовах корпоративних приміщень із імітацією факторів впливу та врахуванням геометричних розмірів, що дає змогу виявляти особливості поширення сигналів у приміщеннях, сеансів передачі кадрів та роботу радіоканалів в умовах існування різного роду факторів впливу.

РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РАДІОКАНАЛІВ КОРПОРАТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

6.1 Розроблення логіко-аналітичного інструменту процесу оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів

У розділі 1 на рис. 1.25, запропоновано структурну схему мережі, на основі якої можна узагальнити вирішення науково-прикладної проблеми розробленням методології оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів телекомунікаційних корпоративних мереж шляхом створення логіко-аналітичного інструменту на основі отриманих моделей та інтегральних показників. До вхідних параметрів можна віднести: потужність сигналу на вході приймача P_{Rx} , ефективна швидкість передачі інформації V_{eff} та пропускна здатність каналу V_{pl} ; ряд факторів впливу, які можна поділити на енергетичні, інформаційні та універсальні. Вхідні параметри отримуються за допомогою методів вимірювання, які реалізовані на базі програмно-апаратних засобів моніторингу приймально-передавальних пристроїв, а також із використанням статистичного аналізу і статистичних зв'язків між основними параметрами радіоканалів. Експериментальні дослідження дисертаційної роботи отримано на базі корпоративних мереж та актуального, на даний час, обладнання відповідних стандартів. Але з часом, обладнання застаріває та існуючі стандарти побудови радіоканалів вдосконалюються. На основі власних експериментальних досліджень актуальних і застарілих стандартів побудови радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, а також порівняння їх із іншими науковими дослідженнями, встановлено, що всі процеси поширення хвиль в умовах приміщень є подібними. Тому, є актуальним, розробити універсальний логіко-аналітичний інструмент процесу оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів, який повинен узагальнити розроблені моделі та інтегральні показники у методологію з метою підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах

проектування та оптимізації для будь-яких стандартів, як актуальних на даний час 5G/Wi-Fi, так і для майбутніх 6G/Wi-Fi 7.

Спершу, проведемо аналіз основних параметрів радіоканалу як випадкових величин. Як приклад, розглянемо фрагменти часових розподілів потужності сигналу на вході приймача P_{Rx} та ефективної швидкості передачі інформації V_{eff} для високочутливого приймача на відстані 1 м від точки доступу та без завад (параметр V_{eff} представлений кількістю кадрів за одиницю часу). Результати наведено на рис. 6.1.

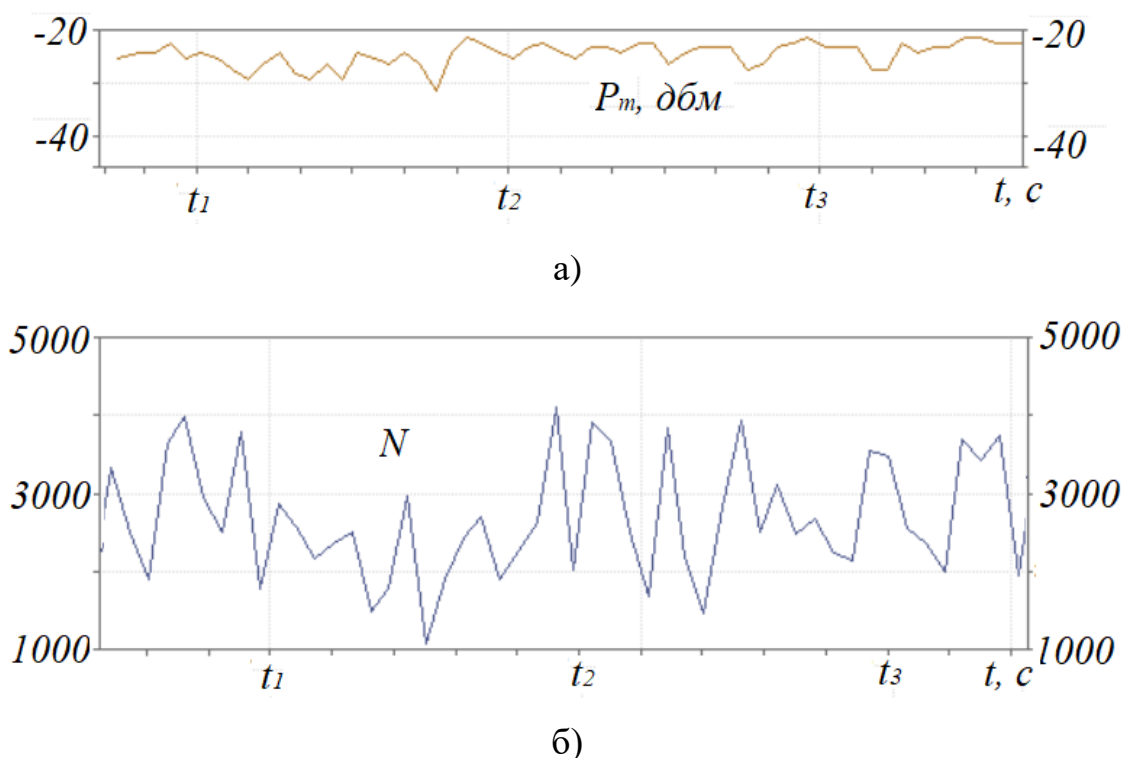


Рис. 6.1. Фрагменти часових розподілів для: а – потужності сигналу на вході приймача; б – кількості вдало прийнятих кадрів ефективної швидкості передачі інформації

Як видно із результатів на рис. 6.1, на основі програмно-апаратних засобів моніторингу можна отримати вибірки вимірювання $P_{m.1}, \dots, P_{m.n}$ та $V_{m.1}, \dots, V_{m.k}$, які є випадковими величинами. Для оцінювання вимірювальних значень основних параметрів радіоканалу P_m і V_m необхідно виконати статистичний аналіз [283, 284]. Середні значення таких вибірок можна записати так:

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i}, \quad V_m = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k V_{m,i}. \quad (6.1)$$

де, враховуючи вирази (3.3) і (3.23) отримаємо:

$$V_m = (L - L_{c.TCP} - L_{c.IP})N. \quad (6.2)$$

Для оцінки медіани вказаних вибірок, можна використовувати наступні співвідношення:

$$me(P_m) = \begin{cases} P_{m,(\frac{n-1}{2+1})}, & \text{якщо } n \text{ парне,} \\ \frac{P_{m,(\frac{n}{2}-1)} + P_{m,(\frac{n}{2}+1)}}{2}, & \text{якщо } n \text{ непарне;} \end{cases} \quad (6.3)$$

$$me(V_m) = \begin{cases} V_{m,(\frac{k-1}{2+1})}, & \text{якщо } k \text{ парне,} \\ \frac{V_{m,(\frac{k}{2}-1)} + V_{m,(\frac{k}{2}+1)}}{2}, & \text{якщо } k \text{ непарне.} \end{cases} \quad (6.4)$$

Моду вибірки вимірювання, для якої будуть відповідати максимальні значення щільності імовірності, можна розрахувати так:

$$f(mo(P_m)) = \max f(P_m), \quad f(mo(V_m)) = \max f(V_m). \quad (6.5)$$

Як видно із графіків на рис. 6.1, параметри мають виражені флуктуації, тому є необхідність оцінювати дисперсію, яка запишеться так:

$$\sigma_{P_m}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(P_{m,i} - P_m)^2}{n}, \quad (6.6)$$

$$\sigma_{V_m}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(V_{m.i} - V_m)^2}{k}. \quad (6.7)$$

Маючи середнє значення вимірювальних параметрів та величину їх відхилення можна визначити імовірність попадання кожного вимірювального значення у вказані інтервали, яка визначається на основі закону розподілу:

$$P_{P_m}(\Delta_1^{P_m} < P_m < \Delta_2^{P_m}) = \int_{\Delta_1^{P_m}}^{\Delta_2^{P_m}} f(P_m) dP_m, \quad (6.8)$$

$$P_{V_m}(\Delta_1^{V_m} < V_m < \Delta_2^{V_m}) = \int_{\Delta_1^{V_m}}^{\Delta_2^{V_m}} f(V_m) dV_m. \quad (6.9)$$

Як правило, для експериментальних досліджень основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж можна приймати гіпотезу нормального закону розподілу або закону χ^2 . Закон χ^2 наближається до нормального при великій кількості вимірювань інформативного параметра, що передбачається для отримання високої достовірності. Тому, можна використовувати нормальний закон розподілу, але враховувати його асиметрію та крутість вершини. Асиметрію закону розподілу можна оцінити так:

$$As(P_m) = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{m.i} - P_m)^3}{n\sigma_{P_m}^3}, \quad (6.10)$$

$$As(V_m) = \frac{\sum_{i=1}^k (V_{m.i} - V_m)^3}{k\sigma_{V_m}^3}. \quad (6.11)$$

Оцінку крутості вершини закону розподілу або ексцес можна виконати за наступним виразом:

$$Es(P_m) = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{m.i} - P_m)^4}{n\sigma_{P_m}^4} - 3, \quad (6.12)$$

$$Es(V_m) = \frac{\sum_{i=1}^k (V_{m.i} - V_m)^4}{k\sigma_{V_m}^4} - 3. \quad (6.13)$$

Як було встановлено у попередніх розділах, на основні параметри радіоканалів у приміщеннях діє велика кількість факторів впливу, що мають випадковий характер та є незалежними один від одного. Тому, враховуючи флуктуації параметрів, доцільно використовувати нормальний закон розподілу, як наближену методику оцінювання:

$$f(P_m) \approx \frac{1}{\sigma_{P_m} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(P_{m.i} - P_m)^2}{2\sigma_{P_m}^2}}, \quad (6.14)$$

$$f(V_m) \approx \frac{1}{\sigma_{V_m} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V_{m.i} - V_m)^2}{2\sigma_{V_m}^2}}. \quad (6.15)$$

Такий закон розподілу, оцінює основні параметри радіоканалу для середньостатистичних значень, та враховує сумарну дію факторів впливу на основі похибки відхилення із використанням асиметрії та ексцесу, що необхідно враховувати при визначенні довірчого інтервалу.

Враховуючи специфіку програмно-апаратних засобів моніторингу для радіоканалів корпоративних мереж, час вимірювання одного параметра визначимо як t , що як правило становить 1 с. Період моніторингу T буде визначатись на основі забезпечення необхідної достовірності оцінювання із наперед визначеним інтервалом (t_1, t_2) .

Враховуючи структуру на рис. 1.25, аналіз технічного стану мережі на основі заданих параметрів оцінювання можна записати так:

$$K_P = \frac{P_m(t)}{P_t}, \quad K_V = \frac{V_m(t)}{V_{pl}}, \quad (6.16)$$

де P_t та V_{pl} – вхідні параметри згідно специфікацій стандарту та визначають нормальний стан мережі і задаються на основі схеми MCS.

Враховуючи дію факторів впливу, оцінювання основних параметрів можна записати так:

$$P_m(t) = P_t \cdot F_1(A_1(t) \dots A_k(t), S_1(t) \dots S_n(t), B_1(t) \dots B_r(t), C_1(t) \dots C_z(t), H_1(t) \dots H_x(t)), \quad (6.17)$$

$$V_m(t) = V_{pl} \cdot F_2(A_1(t) \dots A_k(t), S_1(t) \dots S_n(t), B_1(t) \dots B_r(t), C_1(t) \dots C_z(t), H_1(t) \dots H_x(t)) \cdot F_3(V_{pl.1} \dots V_{pl.v}), \quad (6.18)$$

де F_1 , F_2 , F_3 – функції зв'язку факторів впливу із основними параметрами радіоканалу.

Підставляючи (6.17) і (6.18) у (6.16) отримаємо модель оцінювання технічного стану радіоканалу, яку можна записати так:

$$K_P = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} F_1(A_1 \dots A_k, S_1 \dots S_n, B_1 \dots B_r, C_1 \dots C_z, H_1 \dots H_x) dt, \quad (6.19)$$

$$K_V = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} F_2(A_1 \dots A_k, S_1 \dots S_n, B_1 \dots B_r, C_1 \dots C_z, H_1 \dots H_x) \cdot F_3(V_{pl.1} \dots V_{pl.v}) dt. \quad (6.20)$$

Отримана модель є узагальненим теоретичним записом дії сукупності факторів впливу на основні параметри радіоканалу за період спостереження. З практичної точки зору, функції F_1 , F_2 і F_3 можна виразити на основі моделей

регресії [275] основних параметрів із врахуванням довжини радіоканалу. Таким чином, отримаємо:

$$P_{Rx} = m_{P_m}(l, P_m) \pm \Delta P, \quad V_{eff} = m_{V_m}(l, V_m) \pm \Delta V, \quad (6.21)$$

де m_{P_m} та $m_{V_{eff}}$ – функції регресії відповідних параметрів.

Період спостереження можна виразити як певну кількість однакових циклів моніторингу n у вказаному інтервалі (t_1, t_2) . Тоді, вирази (6.19) і (6.20) набудуть наступного вигляду:

$$K_P = \frac{m_{P_m} \left(l, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} \right)}{P_t}, \quad K_V = \frac{m_{V_m} \left(l, \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k V_{m.i} \right)}{V_{pl}}. \quad (6.22)$$

Модель (6.22) є узагальненим математичним описом процесу оцінювання основних параметрів радіоканалів, на базі експериментальних досліджень. На основі таких моделей, оцінювання різних параметрів є незалежним одне від одного, що робить процес оцінювання досить затратним у часі, але із високою достовірністю кінцевого результату, що доцільно використовувати для оптимізації технічних параметрів мереж в реальному часі.

Значно зменшити час на отримання результату оцінювання можна на основі вимірювання тільки потужності сигналу на вході приймача використовуючи коефіцієнт зв'язку між основними параметрами радіоканалів. Такий коефіцієнт можна записати так:

$$r(V_m, P_m) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(V_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m.i} \right) \left(P_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} \right) \right)}{\sigma_{V_m} \sigma_{P_m}}. \quad (6.23)$$

Параметри статистичного зв'язку можна визначити на основі функцій статистичного зв'язку, які можна отримати на основі ліній регресій. В такому випадку отримаємо:

$$V_m = m_{V_m}(P_m), \quad P_m = m_{P_m}(V_m). \quad (6.24)$$

де m_{V_m} та m_{P_m} – коефіцієнти регресії, які можна визначити так:

$$m_{V_m} = \frac{r(V_m, P_m)\sigma_{P_m}}{\sigma_{V_m}}, \quad m_{P_m} = \frac{r(V_m, P_m)\sigma_{V_m}}{\sigma_{P_m}}. \quad (6.25)$$

Тоді, враховуючи вираз (6.23) і (6.24) модель оцінювання основних параметрів радіоканалу набуде наступного вигляду:

$$K_P = \frac{r(V_m, P_m)\sigma_{V_m}}{\sigma_{P_m}}(m_{V_m}(P_m)) / P_t, \quad (6.26)$$

$$K_V = \frac{r(V_m, P_m)\sigma_{P_m}}{\sigma_{V_m}}(m_{P_m}(V_m)) / V_{pl}. \quad (6.27)$$

Моделі (6.26) і (6.27) дозволяють встановити зв'язок між основними параметрами радіоканалу, а також між факторами впливу. Враховуючи те, що для додатків прикладного рівня основним є параметр ефективної швидкості передачі інформації, а вимірювання потужності сигналу на вході приймача виконується приймальним пристроєм, то підставляючи (6.21) у (6.27) отримаємо:

$$K_d^V = \frac{r(V_m, P_m)\sigma_{P_m}}{\sigma_{V_m}}(m_{P_m}(l, P_m)) / V_{pl}. \quad (6.28)$$

Вираз (6.28) є узагальненим описом процесу оцінювання ефективної швидкості передачі інформації по всій довжині радіоканалу і має незначні затрати часу на отримання кінцевого результату. Достовірність процесу оцінювання за такою моделлю буде залежати від кількості отриманих точок $(V_{m,i}, l)$, $(P_{m,i}, l)$ та $(V_{m,i}, P_{m,i})$.

Враховуючи результати експериментальних досліджень у попередніх розділах, найбільш оптимальним статистичним зв'язком між основними вимірювальними параметрами буде лінійне рівняння регресії, яке вносить незначну похибку. Тоді, загальну модель оцінювання на основі критеріїв енергетичної та інформаційної ефективностей можна записати так:

$$K_P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{m,i}) \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(V_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m,i} \right) \left(P_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} \right) \right)}{P_t \sum_{i=1}^n \left(P_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} \right)^2}. \quad (6.29)$$

$$K_V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{m,i}) \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(V_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m,i} \right) \left(P_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} \right) \right)}{V_{pl} \sum_{i=1}^n \left(V_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m,i} \right)^2}, \quad (6.30)$$

або, якщо враховувати дію факторів впливу:

$$K_P = \sum_{i=1}^n (V_{m,i}) \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(V_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m,i} \right) \left(P_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} \right) \right)}{\sum_{i=1}^n P_{m,i} \sum_{i=1}^n \left(P_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} \right)^2} \times \quad (6.31)$$

$$\times \sum_{i=1}^n (F_1(A_1(t) \dots A_k(t), S_1(t) \dots S_n(t), B_1(t) \dots B_r(t), C_1(t) \dots C_z(t), H_1(t) \dots H_x(t))),$$

$$K_V = \sum_{i=1}^n (P_{m.i}) \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(V_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m.i} \right) \left(P_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} \right) \right)}{\sum_{i=1}^n V_{m.i} \sum_{i=1}^n \left(V_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m.i} \right)^2} \times \quad (6.32)$$

$$\times \sum_{i=1}^n \left(F_2(A_1 \dots A_k, S_1 \dots S_n, B_1 \dots B_r, C_1 \dots C_z, H_1 \dots H_x) \cdot F_3(V_{pl.1} \dots V_{pl.v}) \right).$$

Враховуючи випадковий характер вимірювальних значень основних параметрів радіоканалу, кінцевий результат є довірчим інтервалом. Для нормального розподілу основних параметрів радіоканалів, такий інтервал можна записати так:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} - \frac{t \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(P_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} \right)^2}}{n} < P_m < \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} + \frac{t \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(P_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} \right)^2}}{n}, \quad (6.33)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m.i} - \frac{t \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(V_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m.i} \right)^2}}{n} < V_m < \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m.i} + \frac{t \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(V_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m.i} \right)^2}}{n}, \quad (6.34)$$

де t – аргумент функції Лапласа.

На основі експериментальних досліджень можна встановити, що нормальний розподіл при моніторингу параметрів радіоканалів, виникає біля 50% випадків. В інших випадках розподіл має асиметрію та ексцес, що по формі більше наближається до χ^2 . Якщо змінну t використати як розподіл Стюдента, то отримаємо більш ширший довірчий інтервал. Несиметричність довірчого інтервалу можна оцінити на основі χ^2 розподілу. Тоді, довірчий інтервал середньоквадратичного відхилення основних параметрів радіоканалів можна записати так:

$$\frac{\sqrt{\frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n \left(P_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} \right)^2}}{\chi_{\frac{1-\gamma}{2}, n-1}} < \sigma_{P_m} < \frac{\sqrt{\frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n \left(P_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} \right)^2}}{\chi_{\frac{1+\gamma}{2}, n-1}}, \quad (6.35)$$

$$\frac{\sqrt{\frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n \left(V_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m,i} \right)^2}}{\chi_{\frac{1-\gamma}{2}, n-1}} < \sigma_{V_m} < \frac{\sqrt{\frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n \left(V_{m,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{m,i} \right)^2}}{\chi_{\frac{1+\gamma}{2}, n-1}}, \quad (6.36)$$

де χ_i – критичні точки розподілу; γ – імовірність розподілу.

При моніторингу параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж доцільно використовувати кількість вимірювань енергетичного параметра $n > 100$ раз і розподіл Стюдента та розподіл χ^2 наближаються до нормального. В результаті в будь-якому випадку отримується наближений довірчий інтервал, величина якого є значно меншою в порівнянні із флуктуаціями часових характеристик, що можна використовувати, як збільшення імовірності.

Таким чином, отримані узагальнені моделі оцінювання основних параметрів і характеристик радіоканалів, в сукупності створюють універсальну систему логіко-аналітичного інструменту отримання достовірної інформації про технічні показники корпоративної телекомунікаційної мережі в приміщеннях та дію факторів впливу. Це є основою, для процесів оптимізації, з метою досягнення максимально-можливої пропускної здатності, мінімізації інформаційних втрат у межах покриття мереж радіодоступу та створення універсального механізму досліджень параметрів радіоканалів стандартів Wi-Fi та 5G для визначення оптимальних умов їх узгодження в умовах обмежених енергетичного та частотного ресурсів.

5.2 Методика оцінювання достовірності розроблених методів та адекватності отриманих моделей

Достовірність методів оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на базі радіодоступу 5G/Wi-Fi можна поділити на три складові: достовірність результатів експериментальних досліджень, на основі яких отримані моделі оцінювання; достовірність вимірювання параметрів P_m і V_m , що залежить від характеристик приймального обладнання у різних виробників; достовірність оцінювання інтервалів ΔP і ΔV , для врахування факторів впливу. Спершу оцінимо вимірювальні можливості існуючих абонентських пристроїв та доцільність їх застосування для процесу оцінювання радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Вимірювання основних параметрів радіоканалів виконується на основі програмно-апаратних засобів моніторингу та обчислення середньостатистичних значень за період спостереження на основі виразів (6.1) для вибірок $P_{m.1}, \dots, P_{m.n}$ і $V_{m.1}, \dots, V_{m.m}$. Визначимо достовірність оцінювання основних параметрів радіоканалу, що застосовувались для розроблення моделей оцінювання у дисертації. Для прикладу візьмемо результати досліджень для стандарту 802.11ac із розділу 3 та представимо як показано на рис. 6.2.

Результати досліджень отримані за допомогою абонентського мобільного пристрою для радіоканалу зі смугою 40 МГц. В загальному, можна виділити короткі радіоканали, де основні діагностичні параметри можна описати лінійним рівнянням регресії (крива 1 на рис. 6.2, а), та довгі – потужність сигналу має логарифмічну модель (крива 2).

Відхилення від середнього значення можна оцінювати за допомогою інтервалів ΔP і ΔV , до яких можна не пред'являти досить високу точність та використовувати математичне усереднення. Враховуючи відповідність інтервалів флуктуацій, кожному інтервалу ΔP можна співставити інтервал ΔV , тоді флуктуації сигналу у приміщенні становлять від ± 2 дБм при мінімальній дії факторів впливу та до $\pm 5..10$ дБм для значної їх кількості, приводять до

флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації до $\pm 0,1 \dots 0,5$ Мб/с, в залежності від кількості існуючих факторів впливу в радіоканалі.

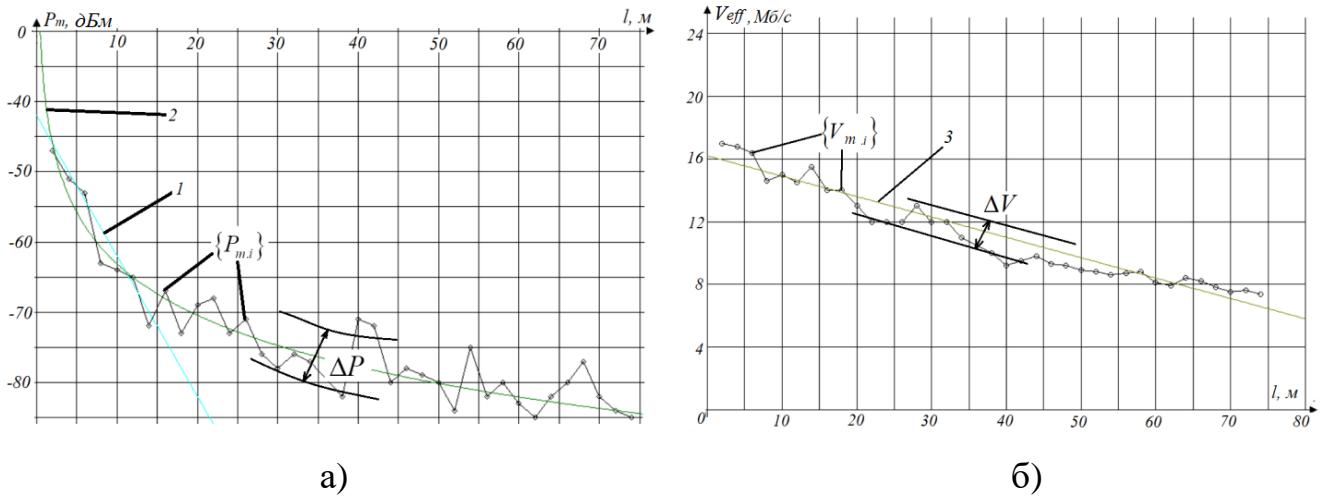


Рис. 6.2. Результати експериментальних досліджень радіоканалу стандарту 802.11a для: а – потужності сигналу на вході приймача; б – ефективної швидкості передачі інформації

Для множини значень вибірок $P_{m,1}, \dots, P_{m,n}$ та $V_{m,1}, \dots, V_{m,m}$, виконано статистичний аналіз, як випадкових величин $\{P_{m,i}\}$ і $\{V_{m,i}\}$ та отримано розподіли, які наведено на рис. 6.3.

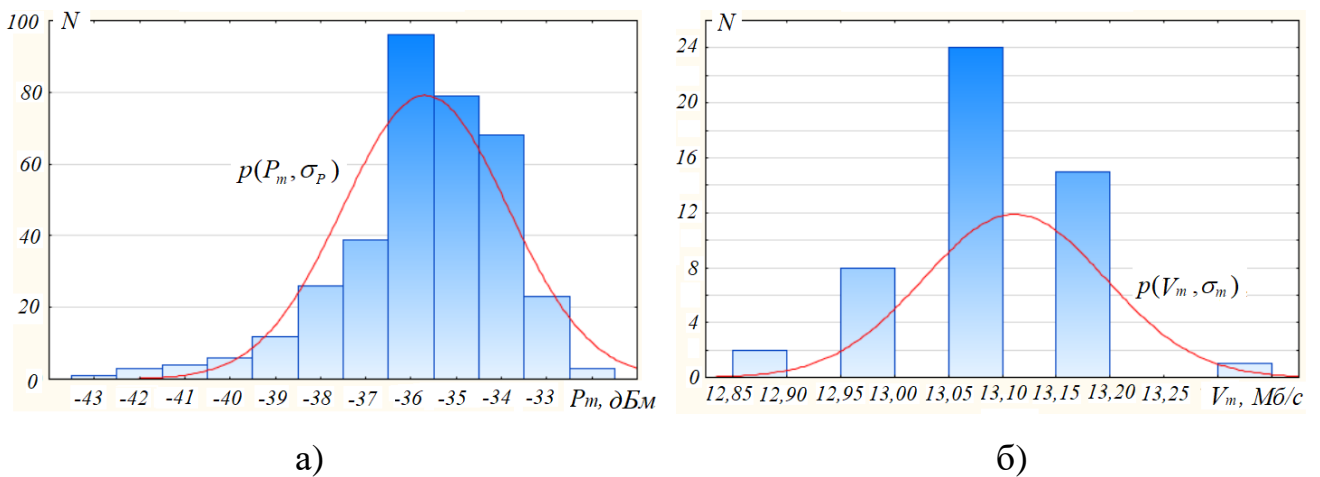


Рис. 6.3. Гістограма розподілу для: а – потужності сигналу на вході приймача; б – ефективної швидкості передачі інформації

Криві $p(P_m, \sigma_P)$ та $p(V_m, \sigma_V)$ показують передбачуваний нормальний закон розподілу. Спершу розглянемо потужність сигналу на вході приймача із аналізом отриманих значень $\{P_m\}_i$ для контрольної відстані біля точки доступу. Додатково, для порівняння, використано незалежний стаціонарний пристрій стандарту 802.11n з частотним каналом 40 МГц у діапазоні 2,4 ГГц. Результати статистичного аналізу при вимірюванні параметра P_m наведено у табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Статистична оцінка результатів експерименту для параметра P_m

Пара-метр	N	Середнє значення	Медіана	Мо-да	Диспер-сія	Асимет-рія	Помил-ка асимет-рії	Екс-цес	Помил-ка ексцесу
P_m (Пр1)	360	-45,07	-45	-45	2,05	-0,04	0,13	-0,5	0,25
P_m (Пр2)	360	-35,7	-36	-36	2,16	-0,94	0,13	1,47	0,25

Із наведеної таблиці видно, що коефіцієнти асиметрії та ексцесу наближаються до нуля, медіана та мода рівні між собою, а середнє значення майже таке ж саме. Тому, можна припустити про гіпотезу нормального закону розподілу $p(P_m, \sigma_P)$. Для перевірки даної гіпотези використано критерії Колмогорова-Смірнова (d) та Шапіро-Уїлка (W), за міжнародним стандартом ISO 3479-97 [286]. Аналіз за такими критеріями наведено на рис. 6.4.

Як видно із результатів на рис. 6.4, критерій Колмогорова-Смірнова наближається до нуля а критерій Шапіро-Уїлка до одиниці. На основі цього, можна говорити про можливість використання нормального розподілу для визначення довірчого інтервалу та отримання наближених результатів. Згідно пп. 6.1, при існуванні наближення можна розглянути довірчі інтервали за трьома випадками: функція Лапласа, коефіцієнт Стьюдента та розподіл χ^2 .

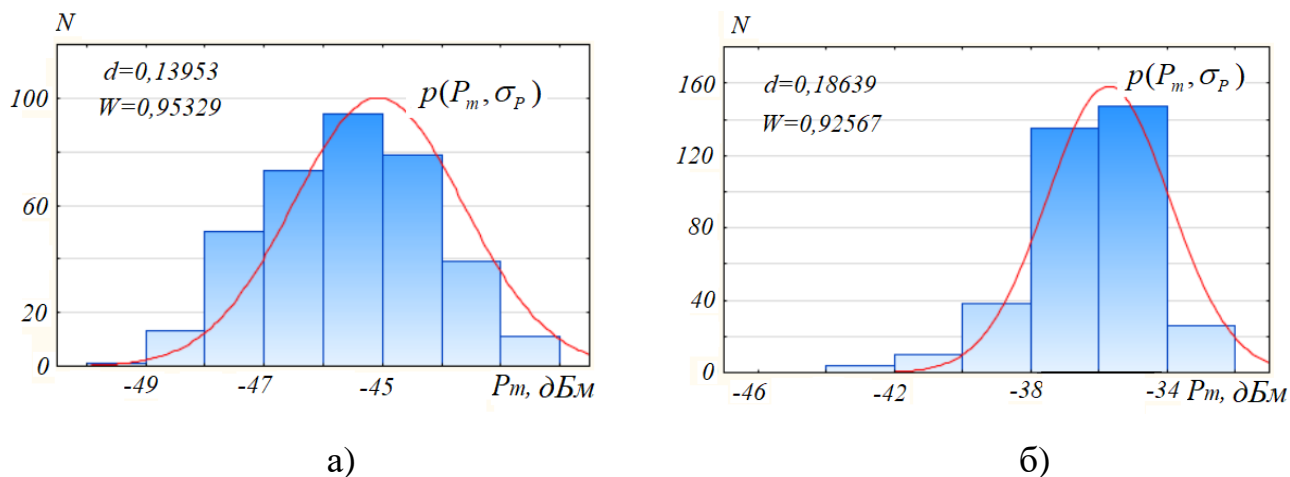


Рис. 6.4. Результати перевірки гіпотези нормального закону розподілу для: а – пристрою 1; б – пристрою 2.

Таким чином, довірчі інтервали, для середньостатистичних значень потужності сигналу на вході приймача можна визначити на основі наступних виразів:

$$\sigma = \pm t \frac{\sum_{i=1}^n \left(P_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} \right)}{\sqrt{n}}, \quad (6.37)$$

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\sqrt{\frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n \left(P_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} \right)^2}}{\chi_{\frac{1-\gamma}{2}, n-1}}, \\ \frac{\sqrt{\frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n \left(P_{m.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m.i} \right)^2}}{\chi_{\frac{1+\gamma}{2}, n-1}}, \end{cases} \quad (6.38)$$

де γ – квантиль розподілу хі-квадрат; t – коефіцієнт Лапласа при відомій дисперсії або коефіцієнт Стьюдента при невідомій дисперсії.

Результати розрахунків за виразами (6.37) і (6.38) для імовірності 0,95 наведено у табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Результати оцінювання довіркових інтервалів потужності сигналу на вході приймача для імовірності 0,95

Довірковий інтервал	Пристрій 1 (дисперсія = 3,29)		Пристрій 2 (дисперсія =2,06)	
	$-\sigma$	$+\sigma$	$-\sigma$	$+\sigma$
t Лапласа	0,2	0,2	0,155	0,155
t Стьюдента	0,18	0,18	0,149	0,149
χ^2	0,12	0,16	0,1	0,22

Як видно із результатів табл. 6.2, та враховуючи флуктуації сигналу ΔP , які спостерігаються на рис. 6.1 а, найбільш близьким буде розподіл χ^2 . Але, якщо підвищити імовірність до 0,997, то для оцінювання за коефіцієнтом t можна отримати наближені результати, як показано в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

Результати оцінювання довіркових інтервалів потужності сигналу на вході приймача для імовірності 0,997

Довірковий інтервал	Пристрій 1 (дисперсія = 3,29)		Пристрій 2 (дисперсія =2,06)	
	$-\sigma$	$+\sigma$	$-\sigma$	$+\sigma$
t	0,3	0,3	0,23	0,23

Таким чином, отримані результати показують, довірчий інтервал, в найгіршому випадку, буде становити $\pm 0,3$ дБм, що є досить високим результатом, якщо порівнювати із існуючими флуктуаціями сигналів у просторі приміщень, навіть при мінімальній дії факторів впливу для прямої видимості.

Далі розглянемо інформаційні параметри ефективної швидкості передачі інформації V_m та пропускної здатності радіоканалу на фізичному рівні V_{pl} . Параметр V_m має набагато вищу складність оцінювання із застосуванням програмно-апаратних засобів моніторингу та, в більшості випадків, потребує

більшого періоду спостереження. Цей параметр можна оцінювати як за допомогою додатків прикладного рівня, так і на основі моніторингу використовуючи статистику кількості вдало прийнятих та переданих кадрів. Але, для додатків прикладного рівня можна обмежитись кількістю вимірів $\{V_m\}_i = 50$, як показано на рис. 5.2 б. Результати статистичної обробки експериментальних досліджень для стандарту 802.11n 40 МГц із достовірністю 0,95, наведено у табл. 6.4.

Таблиця 6.4

Статистична оцінка вимірювання ефективної швидкості передачі інформації для імовірності 0,95

Параметр	N	Середнє значення	Медіана	Мода	Дисперсія	Асиметрія	Помилка асиметрії	Ексцес	Помилка ексцесу
V_{eff}	50	13,11	13,1	13,1	0,007	-0,41	0,33	0,23	0,66
V_{pl}	50	140,1	150	150	226	-1,76	0,33	3,14	0,66
Параметр		$-\sigma(t)$	$+\sigma(t)$			$-\sigma(\chi^2)$		$-\sigma(\chi^2)$	
V_{eff}		0,037	0,037			0,02		0,034	
V_{pl}		6,5	6,5			3,52		6,13	

Як видно із отриманих результатів у табл. 6.4, аналогічно до параметра P_m , можна прийняти нормальний закон розподілу для визначення наближених значень довірчого інтервалу. Для ефективної швидкості передачі інформації довірчий інтервал складе не більше $\pm 0,04$ Мб/с, а для пропускної здатності не більше ± 7 МБ/с.

Оцінка критеріїв Колмогорова-Смірнова та Шапіро-Уїлка для параметрів V_m і V_{pl} наведено на рис. 6.5.

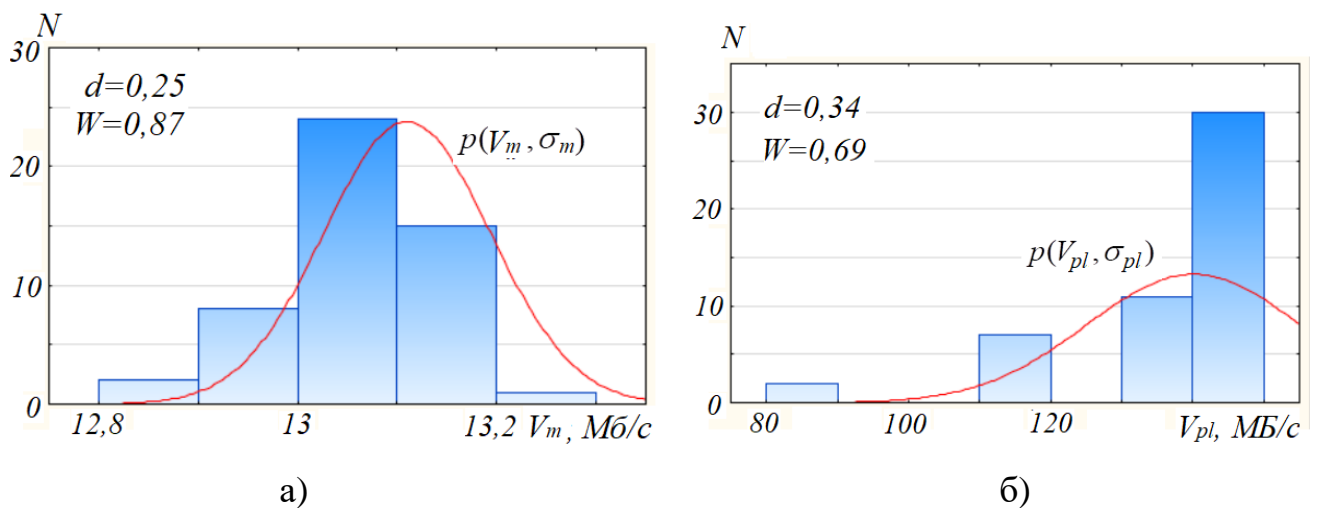


Рис. 6.5. Результати перевірки гіпотези нормального закону розподілу для: а – ефективної швидкості передачі інформації; б – пропускної здатності радіоканалу

Отже, при використанні 50 вимірів для інформаційних параметрів радіоканалів існує більше відхилення від нормального закону розподілу та більш наближене до розподілу χ^2 . Але враховуючи малі значення довірчого інтервалу та особливості циклів передачі пакетів за допомогою кадрів, таку гіпотезу можна приймати, що майже не вплине на кінцевий результат.

Побудова моделей оцінювання основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на основі регресійних моделей потребує знаходження відповідних коефіцієнтів дії факторів впливу. В результаті регресійного аналізу виконується пошук моделі, яка буде найбільш точніше відповідати реальним значенням із високим коефіцієнтом детермінації [285]. В такому випадку, виникає неточність оцінювання параметрів радіоканалів, що можна охарактеризувати як ще один фактор впливу на кінцевий результат. Такий фактор складається із двох складових: адекватність моделі на основі регресійного аналізу, що показує наскільки точно середньостатистичне значення описує отриманий масив вимірювань; статистична достовірність моделей регресії, що показує довірчий інтервал враховуючи розсіювання результатів вимірювання. Тому, для врахування такого фактору необхідно виконати оцінювання

адекватності моделей регресії основних параметрів радіоканалу та визначити їх статистичну достовірність.

Для прикладу, візьмемо лінійну модель регресії для коротких радіоканалів без перешкод та завод довжиною до 16 м. Тоді, маємо наступні моделі оцінювання:

$$P_{Rx}(l) \approx al + P_0, \quad V_{eff}(l) \approx bl + V_0, \quad (5.39)$$

де a і b – коефіцієнти спадання регресії; P_0 і V_0 – початкові значення регресії; l – довжина радіоканалу.

Оцінку параметрів регресії можна визначити через випадкові точкові величини, які можна записати так:

$$a_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Rx,i} \sum_{i=1}^n l_i^2 - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n P_{Rx,i} l_i}{n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2}, \quad P_0^m = \frac{n \sum_{i=1}^n P_{Rx,i} l_i - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n P_{Rx,i}}{n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2}, \quad (6.40)$$

$$b_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_{eff,i} \sum_{i=1}^n l_i^2 - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n V_{eff,i} l_i}{n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2}, \quad V_0^m = \frac{n \sum_{i=1}^n V_{eff,i} l_i - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n V_{eff,i}}{n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2}, \quad (6.41)$$

де n – кількість вимірювань у вибірці.

Зв'язок між параметрами радіоканалу можна визначити на основі функцій статистичного зв'язку, які можна отримати на основі ліній регресій. В такому випадку отримаємо:

$$V_{eff} = m_{V_{eff}}(P_{Rx}), \quad P_{Rx} = m_{P_{Rx}}(V_{eff}). \quad (6.42)$$

де $m_{V_{eff}}$ та $m_{P_{Rx}}$ – коефіцієнти зв'язку регресії.

Згідно виразу (6.23) ступінь зв'язку між потужністю сигналу на вході приймача та ефективною швидкістю передачі інформації, можна записати так:

$$r(V_{eff}, P_{Rx}) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(V_{eff.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{eff.i} \right) \left(P_{Rx.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{Rx.i} \right) \right)}{\sigma_{V_{eff}} \sigma_{P_m}}, \quad (6.43)$$

де $P_{Rx.i}$ і $V_{eff.i}$ – вибірки вимірювальних значень основних параметрів P_{Rx} та V_{eff} ; $\sigma_{P_{Rx}}$ і $\sigma_{V_{eff}}$ – дисперсії вимірювальних параметрів, що показують їх флуктуації.

Коефіцієнти регресії розраховуються як оцінка випадкових точкових величин $P_{Rx.i}$ і $V_{eff.i}$ [285]. Тоді, враховуючи оціночні та отримані значення вимірювальних параметрів, основна регресійна залежність буде визначатись так:

$$\sum_{i=1}^n \left(P_{Rx.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{Rx.i} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(P_{Rx.i} - P_{Rx.i}^1 \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(P_{Rx.i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{Rx.i} \right)^2, \quad (6.44)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(V_{eff.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{eff.i} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(V_{eff.i} - V_{eff.i}^1 \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(V_{eff.i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{eff.i} \right)^2, \quad (6.45)$$

де $P_{Rx.i}^1$ і $V_{eff.i}^1$ – передбачувані значення діагностичних параметрів; $(P_{Rx.i} - P_{Rx.i}^1)$ та $(V_{eff.i} - V_{eff.i}^1)$ – остатки регресії.

Оцінка якості моделі регресії можна визначити залежністю передбачуваних значень від остатків, яка має назву коефіцієнт детермінації. Таким чином, можна отримати:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(P_{Rx.i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{Rx.i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(P_{Rx.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{Rx.i} \right)^2}, \quad r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(V_{eff.i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{eff.i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(V_{eff.i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{eff.i} \right)^2}. \quad (6.46)$$

Оскільки, коефіцієнт детермінації вказує на скільки отримана модель регресії відповідає експериментальним дослідженням, то її можна прийняти як ступінь адекватності моделей оцінювання основних параметрів радіоканалів.

Далі виконаємо аналіз експериментальних досліджень на рис. 6.1 на основі моделей (6.39). Діаграми розсіювання параметра P_{Rx} для лінійної регресії, наведено на рис. 6.6.

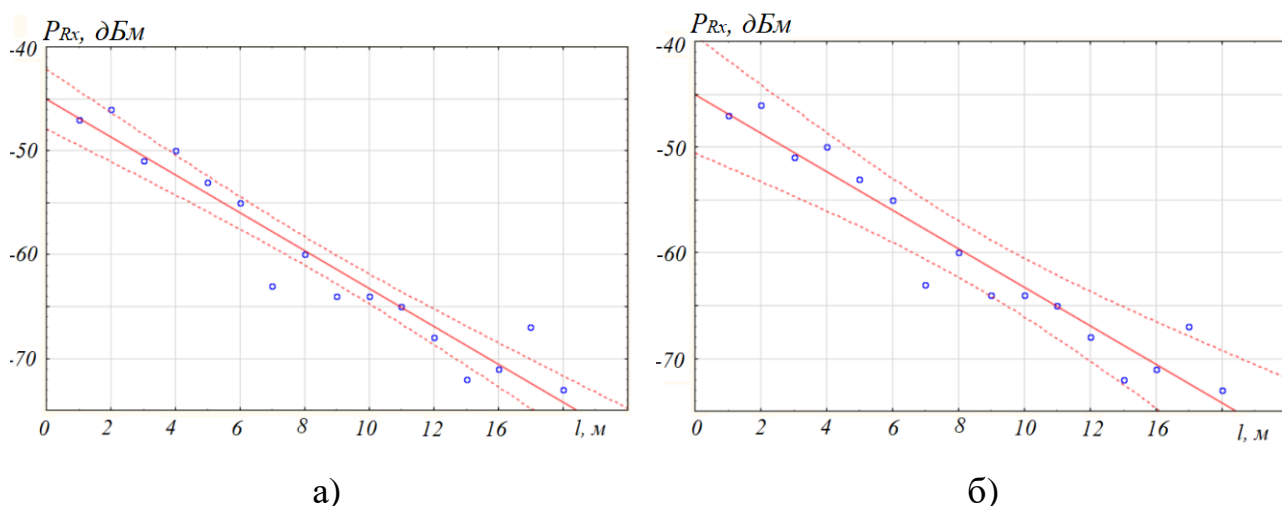


Рис. 6.6. Діаграма розсіювання параметра P_{Rx} для: а – імовірності 0,95; б – імовірності 0,999.

Модель регресії є усередненим значенням діаграми розсіювання що проходить через середні значення таких точок. Коефіцієнти зв'язку регресії становлять: $r \approx -0,975$ та $r^2 \approx 0,95$. Розподіл параметра P_{Rx} по довжині радіоканалу має виражені флуктуації, які в різні періоди спостереження можуть мати різні значення, але не більші ніж в інтервалі між максимальним та мінімальним значеннями. Якщо, встановити імовірність 0,999, то можна отримати діаграму розсіювання де довірчий інтервал набуде розмаху, що буде еквівалентно флуктуаціям характеристик розподілу сигналу у просторі приміщення.

Враховуючи таку закономірність можна оцінювати рівень флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі задання імовірності довірчих

інтервалів регресії при цьому нехтуючи довірчим інтервалом коефіцієнта спадання a .

Далі розглянемо діаграму розсіювання для параметра V_{eff} , які наведено на рис. 6.7.

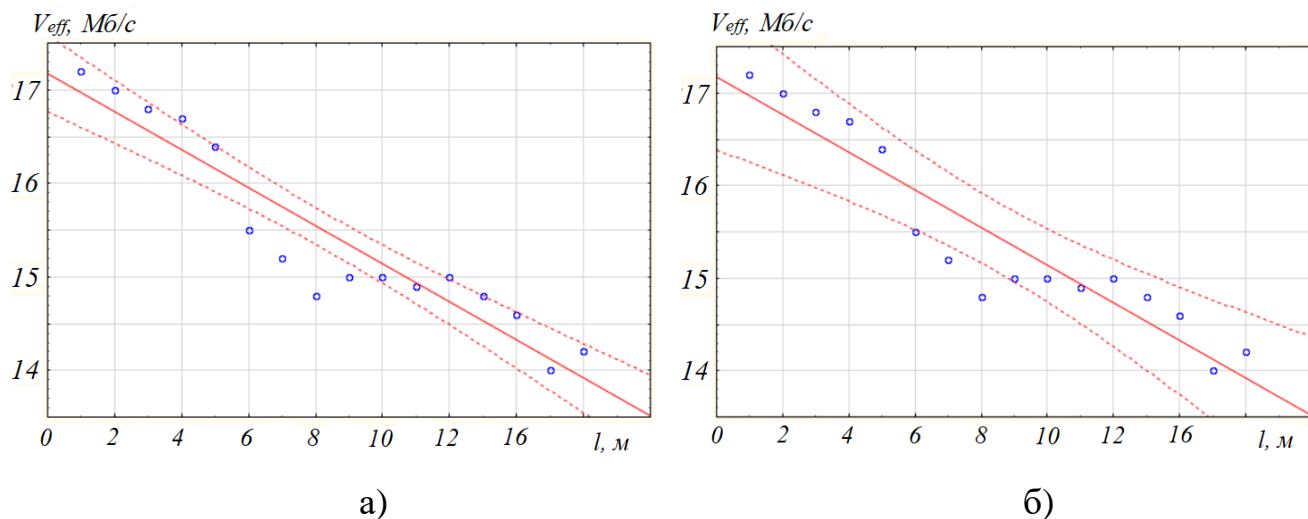


Рис. 6.7. Діаграма розсіювання параметра V_{eff} для: а – імовірності 0,95; б – імовірності 0,999

Коефіцієнти зв'язку регресії становлять: $r \approx -0,95$ та $r^2 \approx 0,9$. Такий результат підтверджує результати оцінювання достовірності експериментальних досліджень. Достовірність є дещо меншою чим у P_{Rx} , із-за меншої кількості отриманих вимірювань та появу додаткових інформаційних факторів впливу.

Враховуючи статистичний зв'язок (6.43) можна виконати регресійний аналіз між основними діагностичними параметрами. Враховуючи спільний параметр l , результати статистичного зв'язку для імовірності 0,95 можна представити як показано на рис. 6.8.

Коефіцієнти зв'язку регресії становлять: $r(V_{eff}/P_{Rx}, l) \approx 0,95$ та $r^2(V_{eff}/P_{Rx}, l) \approx 0,9$. Існування розсіювання результатів вимірювання визначає рівень статистичної достовірності основних параметрів радіоканалу.

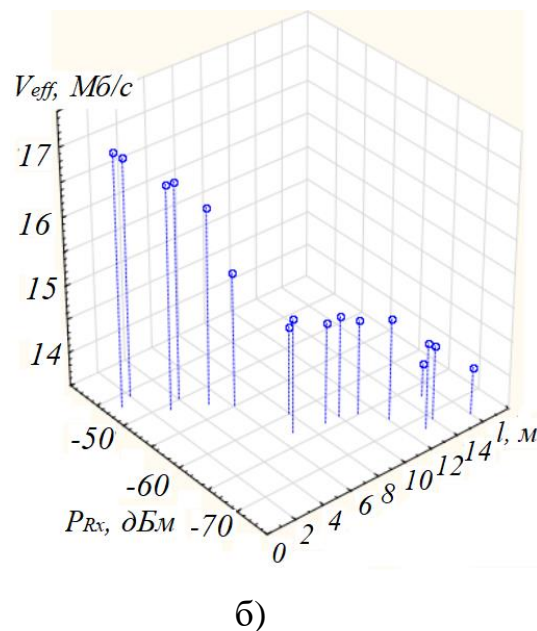
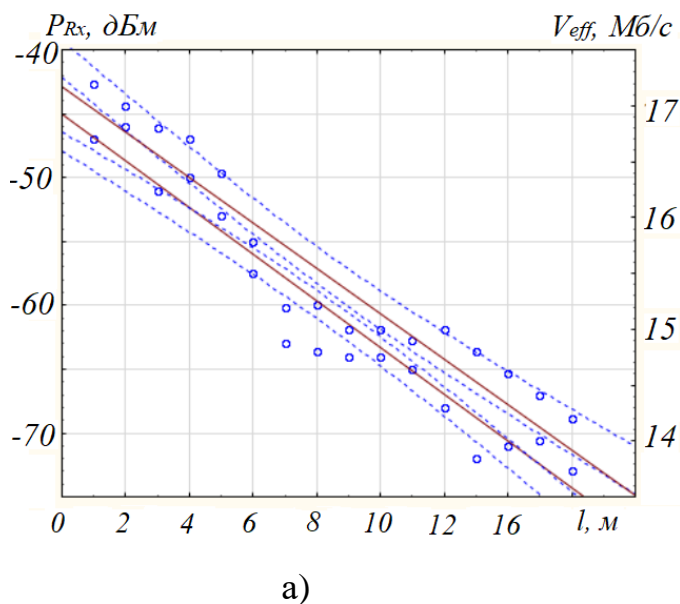


Рис. 6.8. Діаграми розсіювання діагностичних параметрів імовірності: а – 2 мірна; б – 3-мірна.

Таким чином, використання моделей побудованих на основі регресійного аналізу дасть адекватність моделей оцінювання потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації не меншою за 0,95 та 0,9 відповідно.

6.3 Розроблення стохастичної моделі флуктуацій основних параметрів радіоканалу

В розділі 4 запропоновано достовірний спосіб оцінювання флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі статистичної оцінки експериментальних досліджень на основі виразів (4.8) і (4.9). Такий спосіб базується на проведенні великої кількості експериментальних досліджень, що потребує значних затрат часу для спостереження та статистичну обробку масивів результатів експериментальних досліджень. Але в пп. 6.2 встановлено, що виконуючи маніпуляції довірчими інтервалами можна підібрати певний інтервал, що буде відповідати рівню флуктуацій. Спробуємо отримати співвідношення оцінювання флуктуацій основних параметрів радіоканалу на основі

середньостатистичних моделей регресій.

Використаємо моделі регресії (6.39) та вирази для коефіцієнтів регресії (6.40) і (6.41). Оцінку дисперсій регресійного аналізу можна розрахувати так [287]:

$$\sigma_P^2 = \frac{n}{n-2} \sum_{i=1}^n (P_{m.i} - a_m l_i - P_0^m)^2, \quad (6.47)$$

$$\sigma_V^2 = \frac{n}{n-2} \sum_{i=1}^n (V_{eff.i} - b_m l_i - V_0^m)^2. \quad (6.48)$$

Тоді дисперсія параметрів регресії запишеться так:

$$\sigma_a^2 = \frac{\sigma_P^2}{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}, \quad (6.49)$$

$$\sigma_{P_m}^2 = \left(\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2} \right) \sigma_P^2, \quad (6.50)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{\sigma_V^2}{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}, \quad (6.51)$$

$$\sigma_{V_{eff}}^2 = \left(\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2} \right) \sigma_V^2. \quad (6.52)$$

Враховуючи випадковий характер параметрів регресії, довірчі інтервали можна записати так [288]:

$$a_m - \frac{t\sigma_P^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}} < a < a_m + \frac{t\sigma_P^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}}, \quad (6.53)$$

$$P_0^m - t\sigma_P^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}} < P_0 < P_0^m + t\sigma_P^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}, \quad (6.54)$$

$$b_m - \frac{t\sigma_V^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}} < b < b_m + \frac{t\sigma_V^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}}, \quad (6.55)$$

$$V_0^m - t\sigma_V^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}} < V_0 < V_0^m + t\sigma_V^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}. \quad (6.56)$$

де t – коефіцієнт Лапласа при відомій дисперсії або коефіцієнт Стюдента при невідомій дисперсії.

Довірчі інтервали дисперсій складуться:

$$\frac{n \sum_{i=1}^n (P_{m,i} - a_m l_i - P_0^m)^2}{\chi_{\frac{\gamma}{2}, n-2}} < \sigma_{P_m}^2 < \frac{n \sum_{i=1}^n (P_{m,i} - a_m l_i - P_0^m)^2}{\chi_{1-\frac{\gamma}{2}, n-2}}, \quad (6.57)$$

$$\frac{n \sum_{i=1}^n (V_{eff,i} - b_m l_i - V_0^m)^2}{\chi_{\frac{\gamma}{2}, n-2}} < \sigma_{V_{eff}}^2 < \frac{n \sum_{i=1}^n (V_{eff,i} - b_m l_i - V_0^m)^2}{\chi_{1-\frac{\gamma}{2}, n-2}}, \quad (6.58)$$

де χ^2 – розподіл χ^2 -квадрат; γ – квантиль розподілу χ^2 -квадрат.

Лінії регресії є математичним очікуванням для основних параметрів радіоканалу або їх середньостатистичним значенням [279], що показує загальну модель оцінювання. Враховуючи довірчі інтервали параметрів регресії, отримаємо:

$$\begin{aligned} & \left(a_m - \frac{t\sigma_P^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}} \right) l + P_0^m - t\sigma_P^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}} < P_{Rx}(l) \approx \\ & \approx al + P_0 < \left(a_m + \frac{t\sigma_P^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}} \right) l + P_0^m + t\sigma_P^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}, \quad (6.59) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(b_m - \frac{t\sigma_V^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}} \right) l + V_0^m - t\sigma_V^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}} < V_{eff}(l) \approx \\ & \approx bl + V_0 << \left(b_m + \frac{t\sigma_V^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}} \right) l + V_0^m + t\sigma_V^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}. \quad (6.60) \end{aligned}$$

Флуктуації параметрів сигналу виникають при існуванні в радіоканалі різного роду факторів впливу. Для умов приміщень, найбільш вагомим із них, є багатопроменеве поширення хвиль, що залежить від матеріалу та кількості відбиваючих поверхонь у приміщенні. Також, вагомий вплив можуть мати інтерференційні та шумові завади, положення передавача та приймача у просторі приміщення, кількість активних абонентів у мережі і ін. Оскільки, флуктуації проявляються як поява максимумів та мінімумів на часових та просторових характеристиках радіоканалу, то рівень флуктуацій можна визначити як різницю між максимальним та мінімальним відхиленням від середньостатистичних значень параметрів радіоканалу. Тоді отримаємо:

$$\Delta P \approx 2t\sigma_P^2 \left(\frac{l}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}} + \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}} \right), \quad (6.61)$$

$$\Delta V \approx 2t\sigma_V^2 \left(\frac{l}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)}} + \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}} \right). \quad (6.62)$$

Якщо не враховувати залежність рівня флуктуацій від довжини радіоканалу, що для коротких відстаней між передавачем та приймачем є незначним для прямої видимості, то границі довірчих інтервалів регресії будуть залежать від дисперсій та статистичної ймовірності. Тоді вирази (6.61) і (6.62) можна записати так:

$$\Delta P \approx 2t\sigma_P^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}, \quad (6.63)$$

$$\Delta V \approx 2t\sigma_V^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}. \quad (6.64)$$

В найпростішому випадку параметри ΔP та ΔV будуть являти собою еквівалент різниці між максимальним та мінімальним значенням довірчого інтервалу початкових значень регресії. Вирази (6.61) і (6.62) та (6.63) і (6.64) є стохастичними моделями флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій. Така модель використовує співвідношення взаємозв'язку статистичної імовірності, дисперсії та інтервалу флуктуацій, а також статистичний зв'язок між флуктуаціями основних параметрів радіоканалу, що дає можливість значно пришвидшити отримання кінцевого результату оцінювання, оскільки за один цикл оцінювання можна отримати інформацію про технічні параметри радіоканалу та наближений результат інтервалів флуктуацій. Крім того, вирази показують інтервал розсіювання для параметрів регресії, де при прийнятті гіпотези про нормальний закон розподілу, найбільш доцільним буде використання критеріїв Стюдента або «хі»-квадрат. Такі критерії дають можливість отримати довірчі інтервали моделей регресії, які будуть мати наближені значення до рівня флуктуацій основних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Далі визначимо статистичний зв'язок між флуктуаціями основних параметрів радіоканалу корпоративних телекомунікаційних мереж на основі довжини радіоканалу. Враховуючи вирази (6.39), отримаємо:

$$\frac{P_{Rx}(l) - P_0}{b} \approx \frac{V_{eff}(l) - V_0}{a}. \quad (6.65)$$

Із рівняння (6.65) можна визначити один із параметрів радіоканалу на основі іншого наступним чином:

$$P_{Rx}(l) \approx \frac{a(V_{eff}(l) + V_0)}{b} + P_0, \quad (6.66)$$

$$V_{eff}(l) \approx \frac{b(P_{Rx}(l) + P_0)}{a} + V_0. \quad (6.67)$$

Підставляючи (6.40) і (6.41) у (6.67) та довірчі інтервали (6.63) і (6.64), отримаємо:

$$P_{Rx}(l) \approx \frac{\sum_{i=1}^n P_{Rx,i} \sum_{i=1}^n l_i^2 - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n P_{Rx,i} l_i \left(\left(n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2 \right) V_{eff}(l) + n \sum_{i=1}^n V_{eff,i} l_i - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n V_{eff,i} \right)}{n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2 \left(\sum_{i=1}^n V_{eff,i} \sum_{i=1}^n l_i^2 - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n V_{eff,i} l_i \right)} + \frac{n \sum_{i=1}^n P_{Rx,i} l_i - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n P_{Rx,i}}{n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2} \pm t \sigma_P \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}, \quad (6.68)$$

$$V_{eff}(l) \approx \frac{\sum_{i=1}^n V_{eff,i} \sum_{i=1}^n l_i^2 - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n V_{eff,i} l_i \left(\left(n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2 \right) V_{eff}(l) + n \sum_{i=1}^n P_{Rx,i} l_i - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n P_{Rx,i} \right)}{n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2 \left(\sum_{i=1}^n P_{Rx,i} \sum_{i=1}^n l_i^2 - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n P_{Rx,i} l_i \right)}$$

$$+ \frac{n \sum_{i=1}^n V_{eff.i} l_i - \sum_{i=1}^n l_i \sum_{i=1}^n V_{eff.i}}{n \sum_{i=1}^n l_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2} \pm t \sigma_V^2 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n l_i^2}{n^2 \sum_{i=1}^n \left(l_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \right)^2}}. \quad (6.69)$$

Вирази (6.68) та (6.69) показують статистичний зв'язок між основними параметрами радіоканалу. Але такі вирази мають складові оцінки флуктуацій, що не враховують такого зв'язку. Врахуємо відповідність інтервалу флуктуацій ΔP інтервал ΔV , тоді, такі флуктуації визначають границі флуктуацій одного параметра, що приводить до змін іншого, в допустимих межах, що не вплине на затримку при передачі кадрів. В такому випадку, можна говорити про відповідність інтервалів ΔP та ΔV , що можна охарактеризувати як коефіцієнт залежності флуктуацій, який на основі виразів (6.61) та (6.62) можна записати так:

$$k \approx \frac{\Delta P}{\Delta V} \approx \frac{\sigma_P^2}{\sigma_V^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{m.i} - a_m l_i - P_0^m)^2}{\sum_{i=1}^n (V_{eff.i} - b_m l_i - V_0^m)^2}. \quad (6.70)$$

Як видно із виразу (6.70), коефіцієнт залежності флуктуацій показує зв'язок між середньостатистичними значеннями інтервалів флуктуацій ΔP та ΔV при експериментальних дослідженнях та залежить від дисперсій початкових рівнів моделей регресій.

Використовуючи співвідношення (6.61) і (6.62) або (6.63) і (6.64), передбачається визначення середньостатистичних значень рівня флуктуацій на основі регресійних моделей (6.39) для будь-яких стандартів Wi-Fi і 5G із врахуванням довжини радіоканалу. При цьому, задаючи параметр імовірності, існує можливість визначати рівень флуктуацій для певного типу фактору впливу. Для доведення цього, проведено розрахунки флуктуацій на запропонованих співвідношеннях та порівняння із експериментальними дослідженнями. Результати експериментальних досліджень візьмемо із розділу 4 для наступних

радіоканалів: 802,11n, 40 МГц, 2,4 ГГц; 802,11ac, 80 МГц; 802,11n, 20 МГц, 5 ГГц.
Результати наведено у табл. 6.5.

Таблиця 6.5

Порівняльна таблиця вимірювальних та розрахункових інтервалів флуктуацій

Параметри	Формула (4.8) для $l=16$ м	Формула (5.63) для $p=0,85$	Формула (4.9) для $l=80$ м	Формула (5.64) для $p=0,97$
Канал 802,11n, 40 МГц, 2,4 ГГц				
ΔP	± 4 дБм	± 3 дБм	± 6 дБм	± 5 дБм
ΔV	$\pm 0,5$ Мб/с	$\pm 0,7$ Мб/с	± 2 Мб/с	$\pm 1,4$ Мб/с
Канал 802,11ac, 80 МГц				
ΔP	± 5 дБм	$\pm 4,5$ дБм	± 8 дБм	± 9 дБм
ΔV	$\pm 1,5$ Мб/с	$\pm 1,2$ Мб/с	± 2 Мб/с	$\pm 1,8$ Мб/с
Канал 802,11n, 20 МГц, 5 ГГц				
ΔP	± 2 дБм	± 3 дБм	± 4 дБм	± 5 дБм
ΔV	$\pm 0,1$ Мб/с	$\pm 0,13$ Мб/с	$\pm 0,3$ Мб/с	$\pm 0,2$ Мб/с

Із табл. 6.5 видно, що при імовірності 0,85 отримано усереднене значення результатів флуктуацій, що відповідає прямій видимості та із мінімальною кількістю завад при експериментальних вимірюваннях. При більшій довжині радіоканалу у приміщенні збільшується вплив фактору багатопроменевого поширення хвиль, що в результаті відповідає імовірності 0,97. Наведені результати є підтвердженням взаємозв'язку основних параметрів радіоканалу із довірчим інтервалом регресії із можливістю визначення рівня флуктуацій на основі довірчої імовірності.

Залежності взаємозв'язку статистичної імовірності, дисперсії та рівня флуктуацій основних параметрів радіоканалу наведено на рис. 6.9.

Як видно із рис. 6.7, якщо враховувати значну дію факторів впливу, при флуктуаціях до $\pm 5..10$ дБм, які приводять до флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації до $\pm 0,1...0,5$ Мб/с, то еквівалент довірчих інтервалів буде визначатись імовірністю на рівні 0,999. Відхилення параметрів ΔP і ΔV від середньостатистичного значення є незначним, що в найгірших випадках можна отримати приблизно $\Delta P \pm 1,5$ дБм та $\Delta V \pm 0,5$ Мб/с для розподілу « χ^2 »-квадрат, що є досить високим результатом. Такі відхилення є відносно незначними для

флуктуацій, що отримані експериментальним шляхом та автоматично можуть враховуватись при встановленні певного запасу при умовах контролю бітової швидкості та оцінюванні гарантованої пропускної здатності (див. розділ 4).

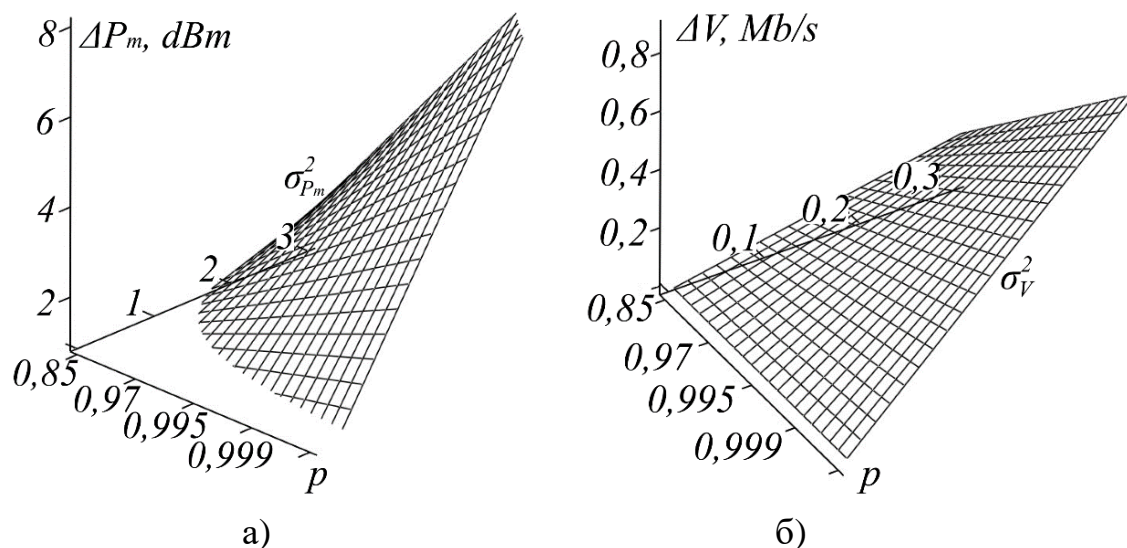


Рис. 6.9. Залежності взаємозв'язку довірчої імовірності, дисперсії та рівня флуктуацій для: а – потужності сигналу на вході приймача; б – ефективної швидкості передачі інформації

Враховуючи отримані результати, суть використання отриманих співвідношень (6.61) і (6.62), як розширення для розроблених моделей оцінювання основних параметрів радіоканалу отриманих у розділах 2, 3 і 4. В такому випадку, отримати оцінку інтервалів флуктуацій можна без потреби обробки великих масивів результатів вимірювання. Якщо не враховувати довірчі інтервали для коефіцієнтів спадання регресій, то можливо використовувати співвідношення (6.63) і (6.64), що дасть незначну похибку, але значно спростить оцінювання..

Використання виразів (4.8) і (4.9) потребує значних затрат часу та додаткової обробки масивів даних. Це додатково додає операції оцінювання флуктуацій у кожній вимірювальній точці радіоканалу до оцінювання основних параметрів. Враховуючи, що необхідно використовувати період спостереження 360 с із циклом моніторингу 1 с, то для радіоканалу довжиною 16 м необхідний час

отримання достовірного результату буде становити не менше 96 хв. Враховуючи вплив випадкових факторів, така операція буде потребувати ще більше часу. Використання співвідношень (6.61) і (6.62) або (6.63) і (6.64) значно пришвидшує отримання кінцевого результату оцінювання, оскільки наблизений результат отримується на базі інтервалів розсіювання моделей регресій. В такому випадку, за одну операцію оцінювання можна отримати технічні показники радіоканалу та рівень існуючих флуктуацій. Якщо враховувати аналогічну побудову всіх різновидів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi, то на основі бази даних коефіцієнтів моделей регресій таке оцінювання можна виконувати для радіоканалів в межах стандарту одночасно. Відхилення параметрів ΔP і ΔV від середньо-статистичного значення є незначним відносно флуктуацій, які отримані експериментальним шляхом. Крім того, такі відхилення автоматично можуть враховуватись при встановленні певного запасу при умовах контролю бітової швидкості. Як недолік, можна виділити проблему створення окремої бази відповідності значень довірчої імовірності для задання різного роду факторів впливу у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж.

6.4 Практична реалізація методології на базі структури корпоративної телекомунікаційної мережі

На теперішній час не існує універсального механізму оцінювання кількісних та якісних показників ефективності оцінювання технічних параметрів мереж. Ефективність оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів умовно можна поділити на дві групи: кількісні показники ефективності оцінювання запропонованими методами та моделями й якісні, що дають можливість покращення технічних показників мережі за рахунок використання запропонованої методології.

Для радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж можна задати кількісні фактори ефективності, що показують на скільки результати оцінювання будуть відповідати реальним характеристикам відносно існуючих рішень, та

якісні показники, на основі яких, можна виконувати оптимізацію існуючих мереж та прогнозувати можливості радіоканалів. Тоді, враховуючи [290], можна записати наступні комплексні коефіцієнти ефективності:

$$K_1 = \sum_{i=1}^n K_i \frac{\Phi_{o.i}}{\Phi_{e.i}}, \quad (6.71)$$

$$K_2 = \sum_{j=1}^m K_j \frac{\Phi_{\kappa.j}}{\Phi_{n.j}}, \quad (6.72)$$

де K_i і K_j – вагові коефіцієнти, що враховують вплив фактору і визначаються експертами; Φ_e – значення еталонного фактору отриманого на основі вимірювань; Φ_o – значення фактору, що оцінюється на основі розроблених або існуючих методів та моделей; Φ_n – значення фактору при поточному стані мережі; Φ_κ – кінцеве значення фактору після оптимізаційної дії при досягненні максимального ефекту.

Вираз (6.71) показує ефективність отримання інформації про радіоканал на основі розроблених методів та моделей, а також врахування факторів впливу. Тоді враховуючи фактори впливу, кількісний коефіцієнт ефективності можна записати так:

$$K_1 = K_P \frac{P_{Rx}}{P_t} \sum_{i=1}^z K_{\Delta P.i} + K_V \frac{V_{eff}}{V_{eff}^e} \sum_{i=1}^k K_{\Delta V.i} \quad (6.73)$$

де K_P – ваговий коефіцієнт потужності сигналу на вході приймача; P_t – теоретична або експериментальна характеристика оцінювання потужності сигналу на вході приймача; P_{Rx} – характеристика отримана на основі запропонованого методу оцінювання потужності сигналу на вході приймача; K_V – ваговий коефіцієнт ефективної швидкості передачі інформації; V_{eff}^e – теоретична або експериментальна характеристика оцінювання ефективної швидкості передачі

інформації; V_{eff} – характеристика отримана на основі запропонованого методу оцінювання ефективної швидкості передачі інформації; K_{AP} – коефіцієнт дії енергетичного фактору впливу; z – кількість енергетичних факторів впливу, які враховуються; K_{AV} – коефіцієнт дії інформаційного фактору впливу; k – кількість інформаційних факторів впливу, які враховуються.

Вираз (6.73) показує ефективність оцінювання основних параметрів та характеристик радіоканалів: потужність сигналу на вході приймача та ефективну швидкість передачі інформації. Тоді визначимо кількісні показники ефективності скориставшись експериментальною перевіркою із порівнянням існуючих рішень та розроблених. Для цього, проведено експериментальні дослідження радіоканалу стандарту 802.11n у приміщенні для частотного діапазону 2,4 ГГц. Фрагмент моніторингу для вказаних умов наведено на рис. 6.10, згідно методики досліджень у розділі 2 і 3.

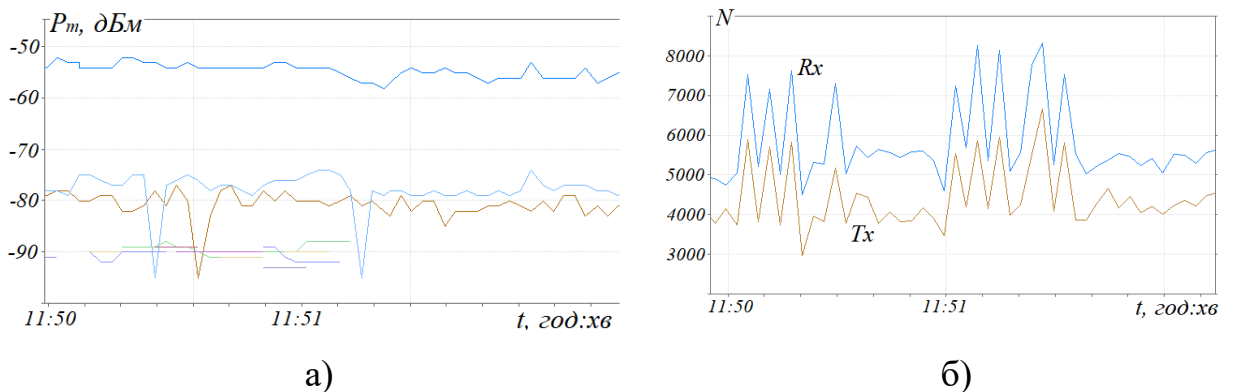


Рис. 6.10. Фрагмент моніторингу потужності сигналу на вході приймача (а) та ефективної швидкості передачі інформації на основі переданих та прийнятих кадрів (б)

Далі проведемо порівняння результатів оцінювання потужності сигналу на вході приймача за різними моделями на основі результатів отриманих на рис. 6.10 а. Для цього, використаємо наступні позначення кривих на графіках: 1 – результати експериментальних вимірювань; 2 – розроблена модель; 3 – ITU-R модель із низьким коефіцієнтом затухання; 4 – логарифмічна модель затухання;

5 – ITU-R модель із середнім коефіцієнтом затушення; 6 – Tata модель затушення у приміщенні [291]. Результати досліджень наведено на рис. 6.11.

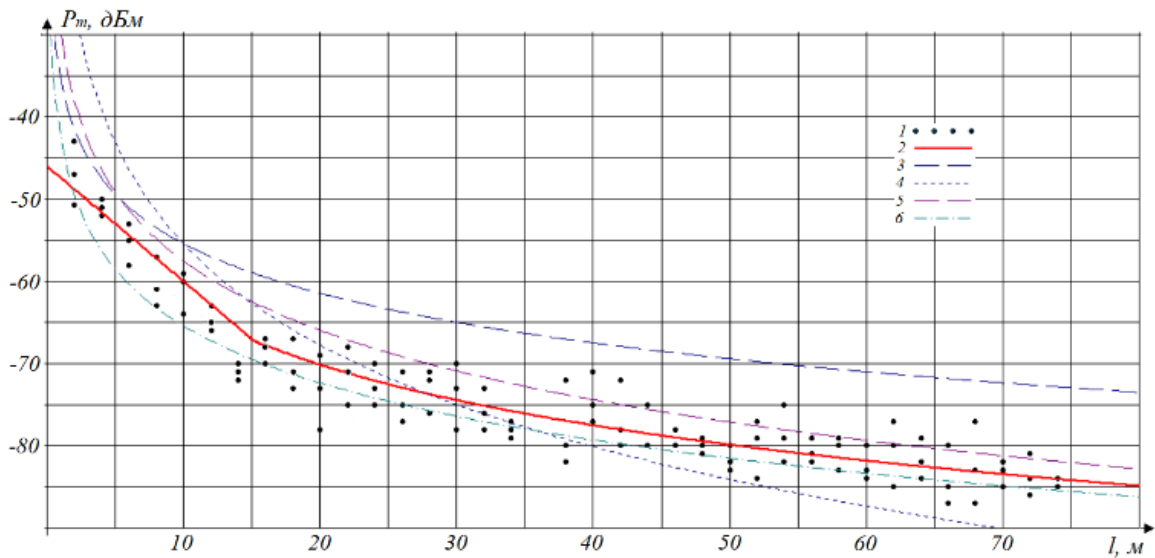


Рис. 6.11. Результати оцінювання потужності сигналу на вході приймача для різних моделей затушення

Для визначення ефективності оцінювання використано усереднені значення вимірювання в чотирьох точках по всій довжині радіоканалу. Результати наведено на рис. 6.12.

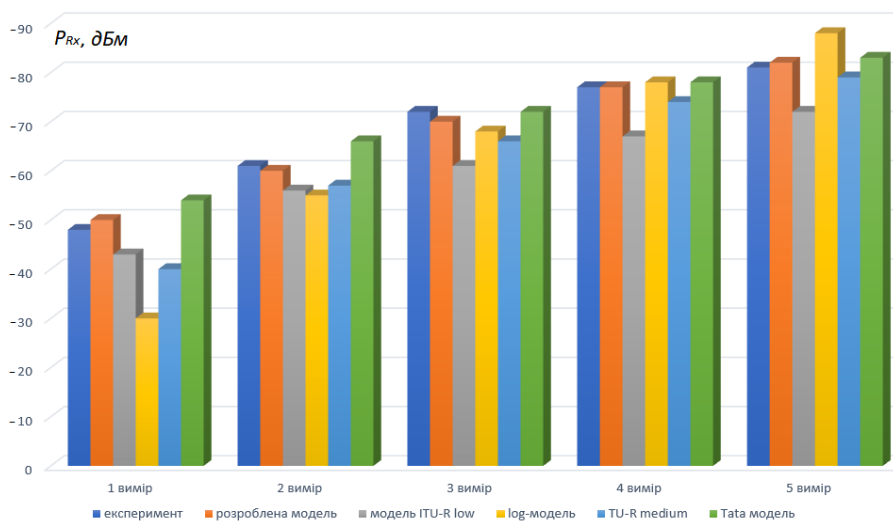


Рис. 6.12. Гістограма порівняння результатів оцінювання за різними моделями

Із рис. 6.12 видно, що найменше відхилення від експериментальних результатів вимірювання має запропонована модель, і ефективність оцінювання потужності сигналу на вході приймача за такою моделлю підвищується, в середньому, на 9 %.

Оцінювання ефективної швидкості передачі інформації проведено на основі інформаційних моделей із врахуванням довжини кадру, що містить в собі корисну інформацію [56, 85, 291]. Для цього використаємо наступні позначення: 1 – запропонована модель із дією незначної кількості факторів впливу; 2 – запропонована модель із дією значної кількості факторів впливу; 3 – розрахункова модель із врахуванням імовірності помилок; 4 – розрахункова модель із врахуванням кількості втрачених пакетів; 5 – модель із врахуванням імовірності виникнення колізій при $p=0$; 6 – модель із врахуванням імовірності виникнення колізій при $p=0,1$; 7 – модель із врахуванням імовірності виникнення колізій при $p=0,5$. Результати оцінювання, для рис. 6.10 б, наведено на рис. 6.13.

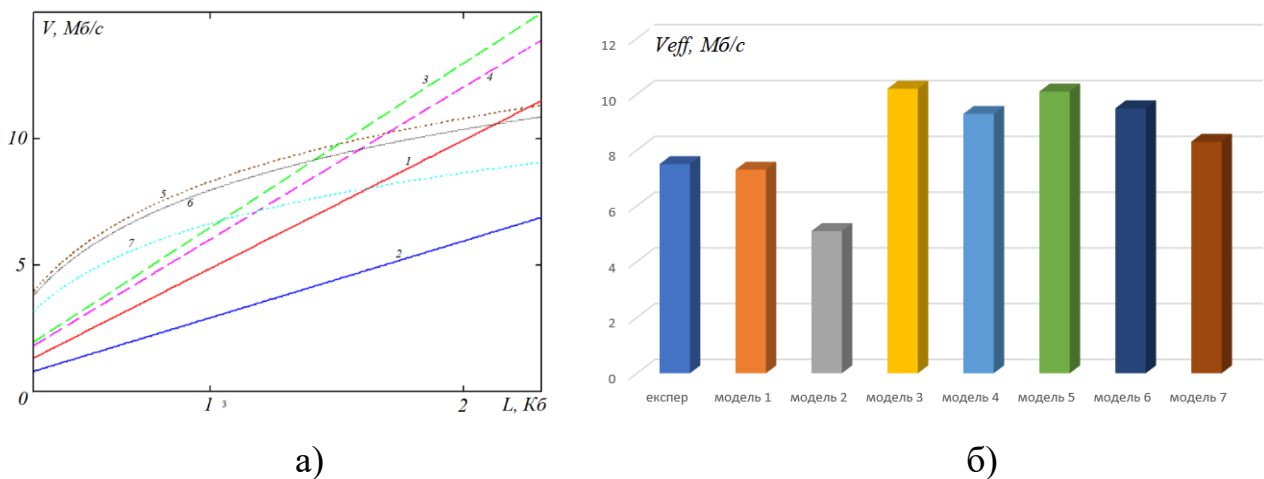


Рис. 6.13. Результати оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для різних інформаційних моделей (а) та гістограма порівняння (б)

Аналіз результатів на рис. 6.13 показав, що числовий показник ефективності оцінювання ефективної швидкості передачі інформації, за розробленими моделями, підвищується в середньому на 12%.

Для повної оцінки ефективності методології до чисельних показників необхідно визначати і якісні, які пов'язані із застосуванням та рівнем використання. До них можна віднести врахування максимально-можливої кількості факторів впливу, оцінювання рівня флуктуацій, можливість прогнозування дії різного роду факторів впливу, прогнозування можливостей радіоканалу для передачі різного роду факторів впливу, можливість використання програмно-апаратних засобів будь-якого приймального пристрою, оцінювання для будь-яких приміщень із різною наповненістю і ін. Але найбільш дієвим способом оцінювання якісних показників буде отримання результатів підвищення ефективності корпоративної мережі в реальних умовах на основі покращення технічних показників радіоканалів. Для цього у приміщенні створимо корпоративну телекомунікаційну мережу та проведемо оптимізацію застосовуючи запропоновану методологію. Структура мережі наведено на рис. 6.14.

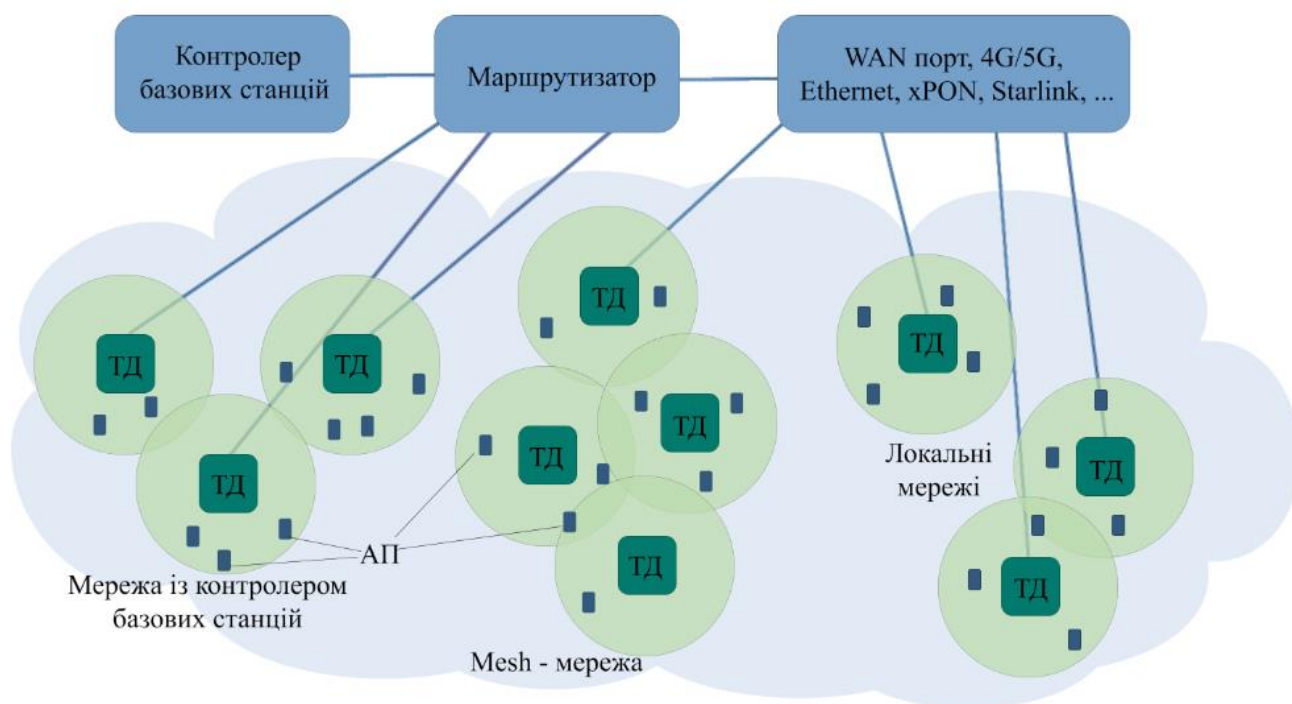


Рис. 6.14. Узагальнена структура мережі радіодоступу корпоративної телекомунікаційної мережі

На рис. 6.14 наведено типові сценарії побудови системи радіодоступу при побудові корпоративних телекомунікаційних мереж для підключення різної кількості абонентських пристроїв, що залежить від потреб корпоративного сектору.

Розглянемо найпростіший сценарій – побудова локальної мережі на основі точки доступу та одного абонентського пристрою. Для покращення технічних показників радіоканалів запропоновано блок-схему методології, на базі розроблених у попередніх розділах методів, моделей та інтегральних показників. Основні етапи методології підвищення ефективності оцінювання радіоканалів із врахуванням параметрів приміщення, наведено на рис. 6.15.

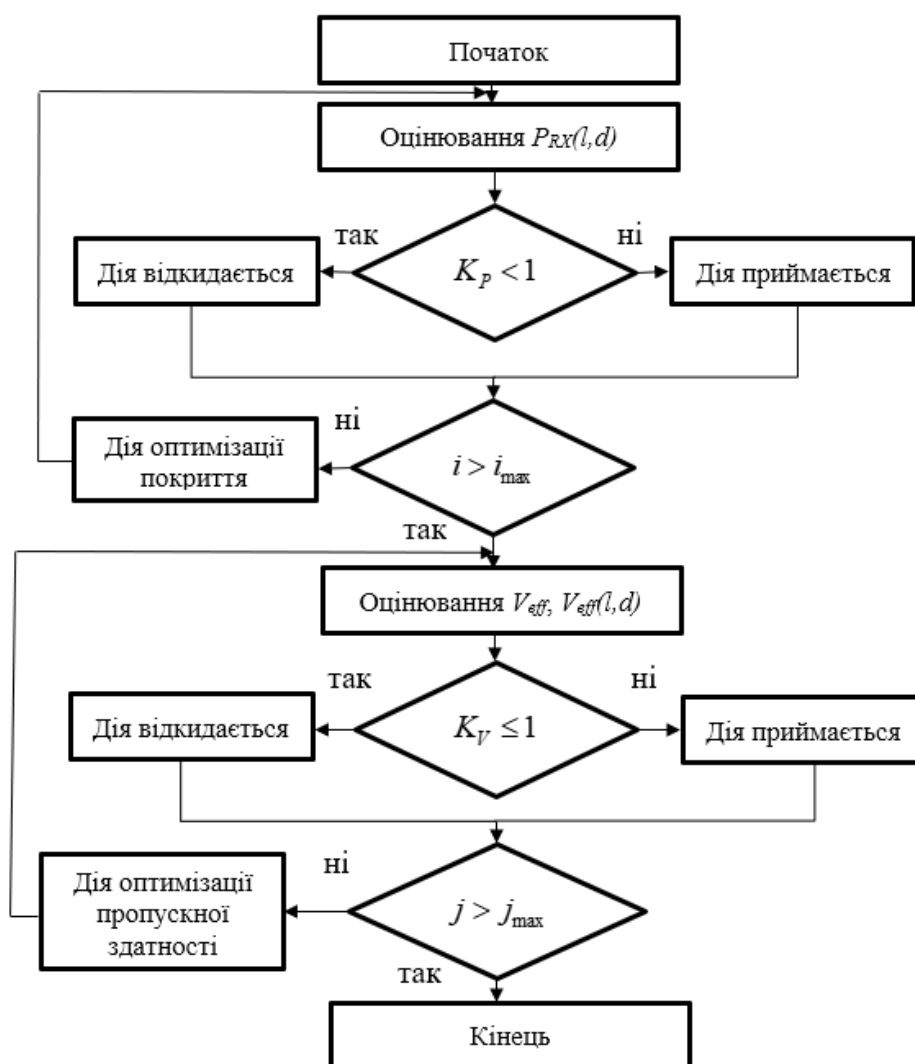


Рис. 6.15. Блок-схема методології підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж

Роботу алгоритму можна сформулювати наступним чином.

Перший крок. На основі програмно-апаратних засобів приймального пристрою виконується оцінювання потужності сигналу на вході приймача із використанням методу просторового оцінювання для отримання покриття мережі у приміщенні $P_{RX}(l,d)$.

Другий крок. Умова порівняння дій, які привели до підвищення рівня потужності сигналу на вході приймача абонентського пристрою:

$$K_P = \frac{P_{Rx.i}(l,d)}{P_{Rx.i+1}(l,d)}, \quad (6.74)$$

де i – кількість наперед заданих дій, що впливають на рівень потужності сигналу на вході приймача.

При початковому оцінюванні коефіцієнт порівняння встановлюється в одиницю. При K_P більшому одиниці дія приймається, що приводить до покращення рівня потужності сигналу на вході приймача, в протилежному випадку дія не враховується та налаштування повертаються в попередній стан.

Третій крок. Цикл виконання запланованих дій: пошук оптимального положення ТД у приміщенні, налаштування діаграми спрямованості антенної системи, регулювання потужності випромінювання ТД і абонентського пристрою для зменшення ефекту несиметричності, зміна модуляції, зміна частотного діапазону, зміна частотного каналу.

В результаті отримується максимально можливий рівень сигналу для покриття максимально можливої площі приміщення із умовою мінімальних інформаційних втрат.

Четвертий крок. Використання методу оцінювання ефективної швидкості передачі інформації V_{eff} або отримання просторового розподілу $V_{eff}(l,d)$.

П'ятий крок. Умова порівняння дій, які привели до підвищення ефективної швидкості передачі інформації для абонентського пристрою:

$$K_v = \frac{V_{eff.j}(l,d)}{V_{eff.j+1}(l,d)}, \quad (6.75)$$

де j – кількість наперед заданих дій, що впливають на ефективну швидкість передачі інформації.

Шостий крок. Цикл виконання запланованих дій. До дій які можуть покращити параметр V_{eff} можна віднести: зміна смуги частотного каналу, пошук іншого частотного каналу, визначення оптимальної кількості кадрів в агрегованому кадрі, задання кодування, зміна режиму контролю якості, зміна режиму енергозбереження, довжина захисного інтервалу, зміна режиму шифрування та ін. В результаті отримується максимально-можлива пропускна здатність радіоканалу для абонентського пристрою, а враховуючи можливості статистичного зв'язку отримується розподіл ефективної швидкості передачі інформації у приміщенні.

Як приклад оптимізації, можна навести результати покращення технічних параметрів радіоканалу, які наведено на рис. 6.16.

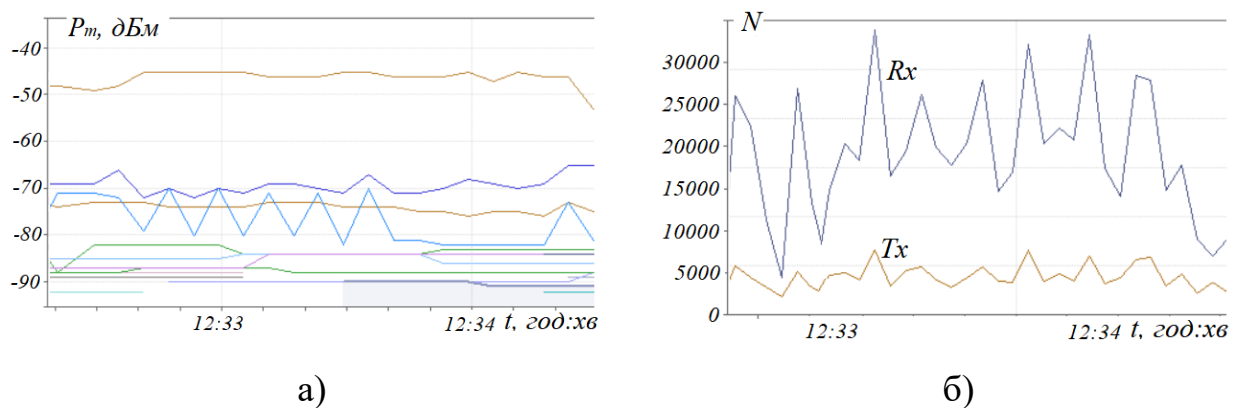


Рис. 6.16. Результат моніторингу параметрів радіоканалу після оптимізації для: а – потужності сигналу на вході приймача; б – кількості переданих та прийнятих кадрів

Аналіз отриманих результатів показує, що покращився параметр потужності сигналу на вході приймача приблизно на 10 дБм, а ефективна швидкість передачі інформації в радіоканалі збільшилась у 3 рази, залишаючи незмінним положення ТД. В результаті отримано більшу площу покриття мережі та у 2 рази вдалося розширити зону гарантованого надання інфокомунікаційної послуги на рівні радіодоступу мережі Wi-Fi, в якій спостерігалася мінімальна кількість інформаційних втрат в умовах існування значних інтерференційних завад.

Інша ситуація виникає у корпоративних приміщеннях де розгорнуто значну кількість локальних мереж радіодоступу разом із корпоративною мережею. Як приклад, складного сценарію, можна навести фрагменти сканування неліцензованих частотних спектрів 2,4 ГГц та 5 ГГц, які показано на рис. 6.18.

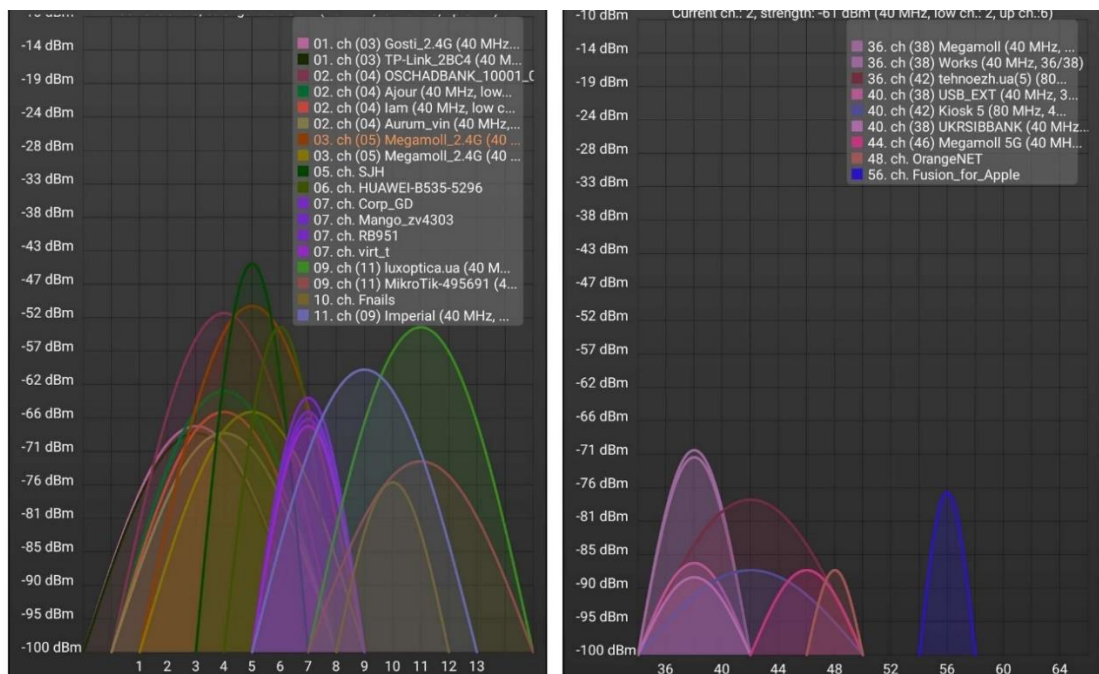


Рис. 6.18. Фрагмент сканування частотного спектра у торговому центрі

В такому випадку, існує значна кількість індивідуальних локальних мереж та корпоративна мережа, що створюють складну інтерференційну картину на основі сусідніх та суміщених каналів. Також, у більшості точок доступу встановлені на максимум рівень випромінювання сигналу, що створило проблему у використанні

високих порядків модуляції та широкосмугових радіоканалів. Покращення технічних показників для всіх мереж у вказаному секторі можна виконувати на базі запропонованої блок-схеми на рис. 6.15, але із врахуванням згасання від архітектурних перешкод, використовуючи інтегральні показники ефективності радіоканалів, та узагальнених інтегральних показників факторів впливу.

Як приклад оптимізації складного сценарію, можна навести результати покращення технічних параметрів корпоративної телекомунікаційної мережі, які наведено на рис. 6.19.

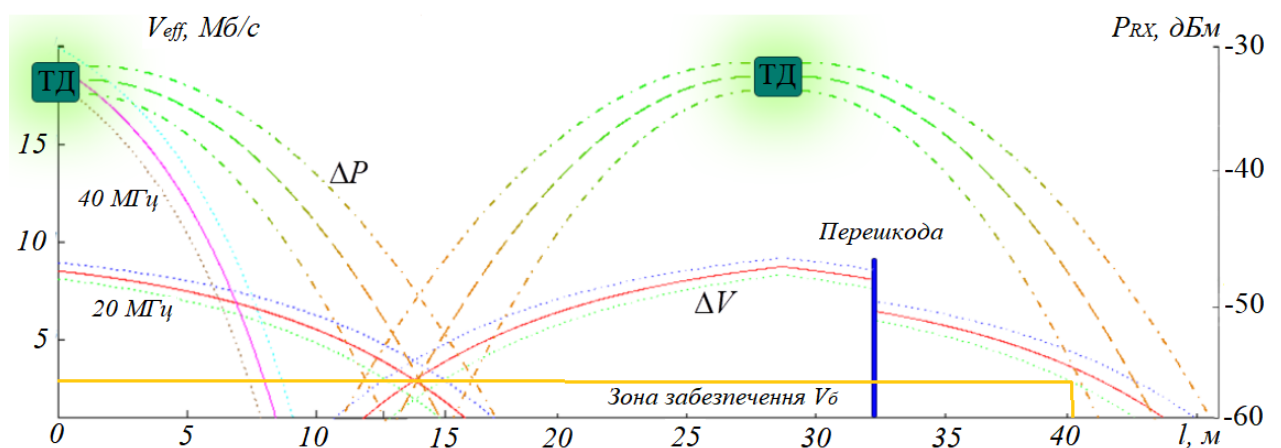


Рис. 6.19. Зона оптимізованого покриття мережі для забезпечення гарантованої бітової швидкості передачі інформації

На рис. 6.19, наведено приклад оптимізації покриття корпоративної телекомунікаційної мережі на основі врахування гарантованої зони надання інфокомунікаційної послуги із потоком відеотрафіку не менше 10 Мбіт/с. На основі блок-схеми методології підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів, отримано оптимальні показники радіоканалів із врахуванням інтерференційних завад та архітектурних перешкод. При значній кількості інтерференційних завад радіоканали із смугою 40 МГц, мають значне спадання ефективної швидкості передачі інформації, що передбачає

автоматичний перехід на частотний канал із смугою 20 МГц. В такому випадку зона забезпечення необхідної бітової швидкості зростає.

Як один із варіантів, практичної реалізації запропонованих у роботі моделей оцінювання основних параметрів радіоканалів, представлено на рис. 6.19.

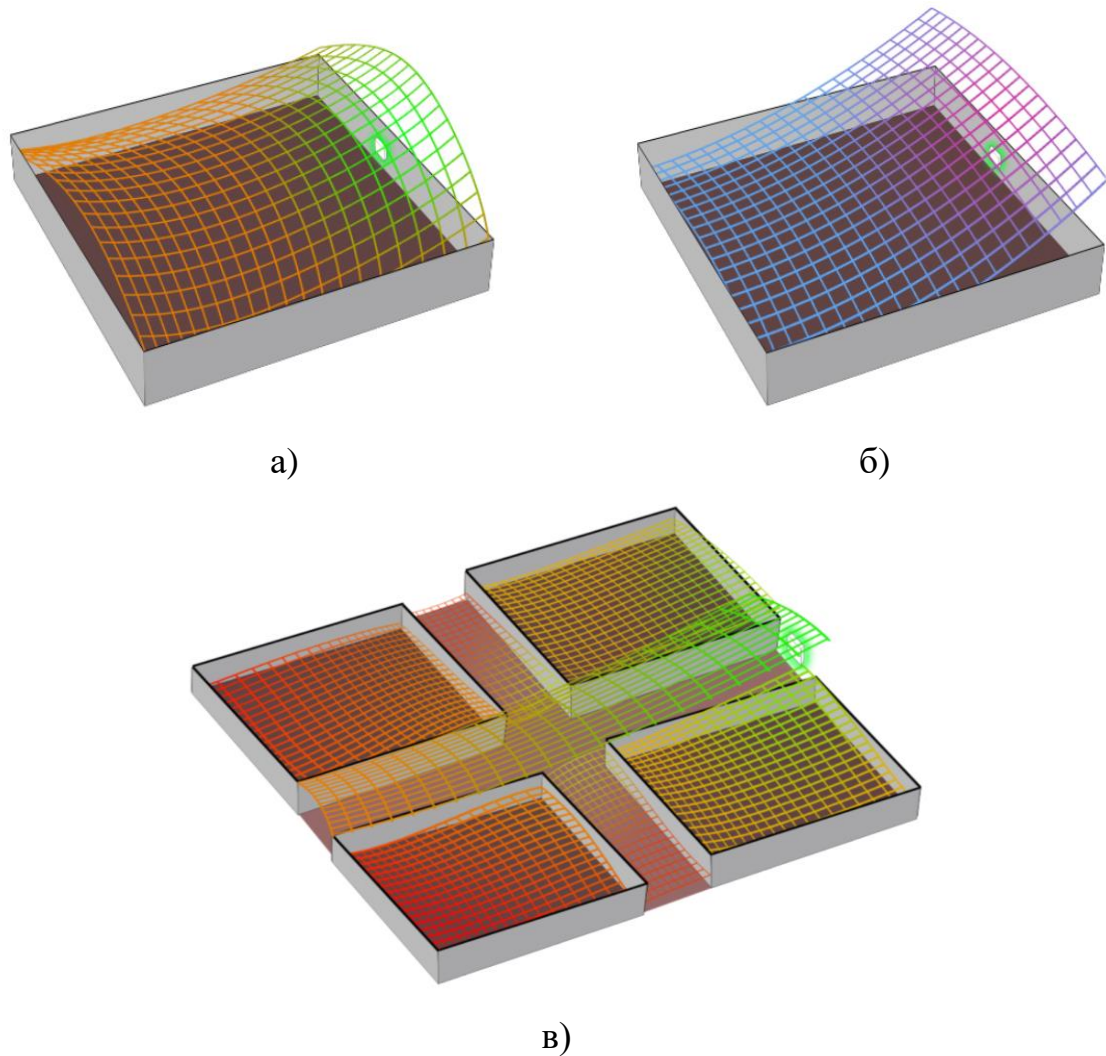


Рис. 6.20. Просторовий розподіл у приміщенні для: а – потужності сигналу на вході приймача; б – ефективної швидкості передачі інформації; в – розподіл сигналу із врахуванням архітектурних перешкод

На рис. 6.20 представлено оцінювання просторових розподілів потужності сигналу та ефективної швидкості передачі інформації у приміщенні, з точки зору приймального пристрою. Таким чином, отримані результати дисертаційної роботи, також, можна використовувати у системах автоматизованого

проектування корпоративних телекомунікаційних мереж для підвищення ефективності прогнозування параметрів радіоканалів та врахування факторів впливу, а також покращення візуалізації процесів середовища передачі.

Висновки до розділу 6

У розділі, на основі теоретичних та експериментальних досліджень, запропоновано практичні аспекти застосування запропонованої методології для покращення технічних параметрів радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж на базі радіодоступу, як для існуючих стандартів 5G/Wi-Fi так і для майбутніх 6G і Wi-Fi 7.

В результаті отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Розроблено універсальний логіко-аналітичний інструмент процесу оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів, який узагальнює розроблені моделі та інтегральні показники у методологію, з метою підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж радіодоступу будь-яких стандартів на етапах проектування та оптимізації.

2. Вперше встановлено, теоретично обґрунтовано та досліджено зв'язок флуктуацій основних параметрів радіоканалів із інтервалом розсіювання моделей регресій, який, на відміну від відомих, використовує статистичну імовірність і дисперсію, що дає можливість значно спростити отримання кінцевого результату інтервалів флуктуацій на основі середньостатистичних результатів моделей оцінювання. На основі цього, набула подальшого розвитку стохастична модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів

3. На основі експериментальних та статистичних досліджень встановлено, що запропоновані методи мають достовірність 0,997 для оцінювання потужності сигналу на вході приймача із похибкою $\pm 0,3$ дБм при флуктуаціях $\Delta P = \pm 2$ дБм та 0,95 для оцінювання ефективної швидкості передачі інформації із похибкою

оцінювання до 0,6 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для випадку мінімальної дії факторів впливу у приміщенні. Ступінь адекватності отриманих моделей, становить не менше за 0,95 для потужності сигналу на вході приймача та 0,9 для ефективної швидкості передачі інформації.

4. Розроблено методологію оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, яка дає змогу підвищити ефективність досліджень, отримання нових знань про роботу радіоканалів в умовах приміщень і дію факторів впливу на їх параметри, що дає можливість створення логіко-аналітичного інструменту для підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації. Основні положення методології використано у запропонованій блок-схемі підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж.

5. Експериментальним шляхом встановлено, що у порівнянні із існуючими методами і моделями оцінювання параметрів радіоканалу, запропоновані рішення дали змогу досягти підвищення ефективності оцінювання потужності сигналу на вході приймача на 9% та ефективної швидкості передачі інформації на 12% використовуючи можливості приймально-передавального обладнання.

6. На основі експериментальних досліджень доведено, що використання запропонованої методології оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж в умовах значного завантаження частотного ресурсу, дало змогу підвищити ефективну швидкість передачі інформації у 3 рази, а рівень сигналу покращити на 8% у порівнянні із традиційними методами. Крім того, в 2 рази, вдалося розширити зону гарантованого надання інфокомунікаційної послуги на рівні радіодоступу мережі Wi-Fi.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема розроблення методології оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів із врахуванням максимально-можливої кількості різноманітних факторів впливу на основі статистичних зв'язків між ними з метою підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. Проведено аналіз сучасного стану проблеми оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi. Встановлено, що використання класичних підходів до оцінювання дають низьку інформативність, за рахунок існування значної кількості факторів впливу, які не враховуються, або значно зростають затрати на оптимізацію за рахунок використання дорогого обладнання. Це потребує створення нових підходів до процесу оцінювання, аналізу і контролю параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж. Визначено, що для підвищення ефективності оцінювання є необхідність детального вивчення, як апаратних рішень технологій радіодоступу, так і процесів які виникають під час передавання даних по радіоканалах.

2. Запропоновано метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача, який, враховує процеси поширення сигналів та внутрішні і зовнішні фактори впливу в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для забезпечення неперервної оптимізації покриття мережі радіодоступу у приміщенні із мінімальними інформаційними втратами. Особливістю методу є використання моделей оцінювання розподілу сигналу безпосередньо у просторі приміщення із врахуванням геометричних розмірів, кутового і центрального положення точки доступу та інтервалу флуктуацій, а також статичних і випадкових факторів впливу, що підвищує ефективність оцінювання на 9% по відношенню до існуючих рішень. Достовірність методу

становить 0,997 при оцінюванні потужності сигналу на вході приймача із похибкою $\pm 0,3$ дБм і флуктуаціях $\Delta P = \pm 2$ дБм.

3. Формалізовано інтегральні показники ефективності радіоканалів на основі регресійних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації, новизною яких, є можливість прогнозування інформаційних втрат в межах покриття мереж радіодоступу та враховувати різного роду архітектурні перешкоди у корпоративних приміщеннях із рівнем адекватності 0,8..0,9.

4. Розроблено метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для покращення результативності управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах радіодоступу і отримання оптимальних технічних показників при існуванні різного роду факторів впливу у корпоративних приміщеннях. Особливістю методу є використання моделей розрахунку середньостатистичного значення ефективної швидкості передачі інформації за період спостереження у будь-якій точці розташування приймального пристрою в зоні дії покриття мережі або враховувати дію факторів впливу та інтервалу флуктуацій по всій довжині радіоканалу, що підвищує ефективність оцінювання на 12% по відношенню до існуючих рішень. Достовірність методу становить 0,95 із похибкою оцінювання до 0,6 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с для випадку мінімальної дії факторів впливу у приміщенні.

5. Вперше запропоновано метод оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку та збільшення швидкодії обробки результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування. Використання такого методу дало змогу підвищити швидкодію отримання кінцевого результату до 5 с із достовірністю 0,95 із похибкою оцінювання до 1 дБм та 1 Мб/с при $\Delta V = \pm 2$ Мб/с при мінімальній дії факторів впливу у приміщенні.

6. Вперше запропоновано узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах на основі еталонних моделей середньостатистичних значень в межах покриття мереж радіодоступу, що дає можливість оцінювати дію факторів

впливу, як окремо так і комплексно. На основі експериментальних досліджень отримано коефіцієнти дії різного роду факторів впливу та інтервали флуктуацій потужності сигналу на вході приймача і ефективної швидкості передачі інформації.

7. Розвинуто математичну модель процесу передавання інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж та стохастичну модель флуктуацій основних параметрів радіоканалів на основі інтервалу розсіювання моделей регресій. На основі математичних досліджень встановлено оптимальні умови роботи радіоканалів при використанні різного роду технологій підвищення ефективності та розподіл ресурсу між активними абонентами у мережі. Також, отримано коефіцієнти просторових розподілів потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації для корпоративних приміщень при кутовому та центральному положенні точки доступу в діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц, що враховують дію статичних і випадкових факторів впливу.

8. Розроблено методологію оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж, яка дає змогу підвищити ефективність досліджень, отримання нових знань про роботу радіоканалів в умовах приміщень і дію факторів впливу на їх параметри, що дає можливість створення логіко-аналітичного інструменту для підвищення технічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж на етапах проектування та оптимізації. Це дає змогу створити універсальну систему отримання оптимальних технічних показників для досягнення максимально можливої пропускної здатності та мінімальних інформаційних втрат у межах покриття систем радіодоступу для будь-яких стандартів Wi-Fi і 4G/5G та визначення оптимальних умов їх узгодження при обмеженні енергетичного та частотного ресурсів.

9. Розроблено блок схему запропонованої методології для знаходження оптимальних технічних параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi при існуванні різного роду факторів впливу. На основі експериментальних досліджень встановлено, що використання такого

алгоритму в умовах значного завантаження частотного ресурсу, дало змогу підвищити ефективну швидкість передачі інформації у 3 рази, а рівень сигналу покращити на 8% у порівнянні із традиційними методами. Крім того, в 2 рази, вдалося розширити зону гарантованого надання інфокомунікаційної послуги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Barachi M., Kara N., Rabah S., Forgues M. An open virtual multi-services networking architecture for the future internet. *Journal of Internet Services and Applications*. 2015. №6. I. 3. P. 1-22. DOI 10.1186/s13174-015-0019-3.
2. Liu D., Wang H., Peng X., McCann S., Fang P., Duan X., Deng H., Lu L. WLAN new technologies in IEEE 802.11. *XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*. Beijing. 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/URSIGASS.2014.6929347.
3. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A survey on enabling technologies protocols and applications. *IEEE Commun. Surveys Tuts*. 2015. №17(4), P. 2347–376. DOI: 10.1109/IWCMC.2015.7289234
4. Kia Wiklundh, Peter Stenumgaard EMC Challenges for the Internet of Things. EMC EUROPE 2017, Angers, France, September 4-8, 2017.
5. Семенко А.І. Сучасний стан створення безпроводних телекомунікаційних систем. Вісник Нац. ун-ту "Львів. політехніка". 2009. № 645. С. 56–67.
6. Сундучков А.К., Остропуцкая Е.А., Фадеева Е.А., Сундучков К.С. Межканальная интерференция и метод оценки ее влияния на прием сигнала. *Электроника и связь*. 2010. № 4. С. 202–206.
7. Chapre P., Mohapatra S., Jha A. Seneviratne Received signal strength indicator and its analysis in a typical WLAN system. *IEEE 38th Conference on Local Computer Networks (LCN)*. Oct. 2013. P. 304–307.
8. Jekabsons G., Kairish V., Zuravlyov V. An Analysis of Wi-Fi Based Indoor Positioning Accuracy. *Scientific Journal of Riga Technical University*. 2011. V. 47. P. 131-137.
9. Shchekotov M. Indoor Localization Method Based on Wi-Fi Trilateration Technique. *Proceeding of the 16th conference of fruct association*. 27-31 October 2014. P. 177-179.

10. Bobescu B., Alexandru M. Mobile Indoor Positioning Using Wi-Fi Localization. *Review of the AirForce Academy, Brasov, Romania*. Nov. 2015. №. 1 (28). P. 119-122.
11. Soldo I., Malarić K. Wi-Fi Parameter Measurements and Analysis. *Proceedings of the 9th International Conference*. 2013. P. 339-342.
12. Chrysikos T., Kotsopoulos S. Site-specific Validation of Path Loss Models and Large-scale Fading Characterization for a Complex Urban Propagation Topology at 2.4 GHz. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. Mr. 13-15, 2013. Vol II. P. 1-6.
13. ЯКИМОВ А.Н. Андреев П.Г., Князева В.В. Моделирование распространения электромагнитных волн в помещении с учетом влияния местных предметов. *Журнал радиоэлектроники*. 2015. №2. С. 1-14.
14. Rani S., Talwar R., Malhotra J., Ahmed S., Sarkar M., Song H. A Novel Scheme for an Energy Efficient Internet of Things Based on Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2015. T.15, №.11. P. 28603-28626. doi:10.3390/s151128603.
15. Afridi, M.A. Microstrip Patch Antenna – Designing at 2.4 GHz Frequency. *Biological and Chemical Research*. Vol. 2015. P. 128-132.
16. Ding N., Wagner D., Chen X., Pathak A., Hu Y. C., Rice A. Characterizing and modeling the impact of wireless signal strength on smartphone battery drain. *Sigmatrics*. 2013. P. 1-12.
17. Производительность и помехозащищенность радиоканалов систем абонентского радиодоступа. Учебное пособие / Под. ред. Проф. В.М. Шокало, проф. В.А. Хорошко. Харьков.: КП «Городская типография». 2011. 294 с.
18. Катин С.В., Шорохова Е.А., Яшнов В.А. Математическая модель электромагнитной обстановки внутри ограниченного пространства. *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. 2013. № 1(98). С. 18-27.
19. Chruszczyk Ł. Statistical Analysis of Indoor RSSI Read-outs for 433 MHz, 868 MHz, 2.4 GHz and 5 GHz ISM Bands. *Intl. journal of electronics and telecommunications*. 2017. V. 63, №. 1. – P. 33-38. DOI: 10.1515/eletel-2017-0005

20. Dolińska I. Rządowski G. Method of DCF Simulation and Analysis for Small Wi-Fi Networks. *Zeszyty naukowe*. 2014. №38. P. 50-64.
21. Laitinen E., Talvitie J., Lohan E.S. On the RSS biases in WLAN-based indoor positioning. *ANLN Workshop at ICC*. 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2015.7414038.
22. Foster K. Radiofrequency exposure from wireless LANs utilizing Wi-Fi technology. *Health Physics In press*. 2007. 280–289. DOI: 10.1097/01.HP.0000248117.74843.34.
23. Davies J. N., Grout, V., Picking R. (2008). Prediction of Wireless Network Signal Strength within a Building. *Proceeding of the 7 Int. Network Conference (Inc 2008)*. 2008. UK. P. 193–207.
24. Kai C., Liew S.C. Towards a more accurate carrier sensing model for CSMA wireless networks. *IEEE International Conference on Communications*. 2010. P. 1–6, DOI: 10.1109/ICC.2010.5502695.
25. Liang L., Wang W., Jia Y., Fu S. A cluster-based energy-efficient resource management scheme for ultra-dense networks. *IEEE*. 2016. №4. P. 6823–6832. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2614517.
26. Hesham A.E.F.S., Lamiaa F.I., Zaki F., Ghadah A.A. Using Clustering Techniques to Plan Indoor Femtocells Layout in the Presence of Obstacles. *World Symposium on Computer Applications & Research (WSCAR' 2017)*. At Istanbul. Turkey. 2017. P. 1-6.
27. Suherman N.M., Romulo S.S., Prayitno H. Wifi-friendly building, enabling wifi signal indoor: an initial study. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 126, P. 1-5. doi:10.1088/1755-1315/126/1/012022.
28. Adeniran A.O., Ajao S.O., Obot S.E. Experimental Determination of Wireless Attenuation Loss of Some Nigerian Roofing and Ceiling Materials. *Innovation: International Journal of Applied*. 2016. V.4. I.1. P. 32-38. DOI: 10.22214/ijraset.2019.4478.
29. Бобало Ю. Я., Даник Ю. Г., Комарова Л. О., Лук'янов О. О. та ін. Моніторинг об'єктів в умовах апріорної невизначеності джерел інформації.

Монографія. Нац. ун-т "Львів. політехніка". Львів, 360 с. 2015. ISBN 978-617-642-188-7.

30. Овдій Д.О., Осадчий Я.О. Методи оптимізації обміну даними в мережах wi-fi. *Наукові записки УНДІЗ*. 2019. №2(54). С. 64-69.

31. Рассомахін С.Г., Веклич С.Г. Компоненти бібліотеки еталонних моделей сигналів в телекомунікаційних протоколах фізичного рівня. *Системи обробки інформації*. 2016, В. 7 (144). С. 148-151.

32. Гоголева М.А., Гаркуша С.В., Ахмед Х.А. Экспериментальное исследование математической модели распределения каналов в многоканальных MESH-сетях стандарта IEEE 802.11. *Радиотехника: Всеукр. Межвед. научн.-техн. сб.* 2010. Вып. 163. С. 99-107.

33. Лемешко А.В., Гаркуша С.В. Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11. *Проблеми телекомунікацій*. 2011. № 2 (4). С. 139–149.

34. Гаркуша С. В. Анализ результатов распределения частотных каналов в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11. *Цифрові технології*. 2011. Вып. 10. С. 27-42.

35. Gogolieva M. Garkusha S., Ahmed H. Mathematical Model of Channel Distribution in Multichannel Mesh Networks 802.11. *The Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics (CADSM 2011)* : February 23-25, 2011. Lviv : Lviv Polytechnic National University. P. 71-73.

36. Квасніков В.П. Дуднік А.С. Наукові основи визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин. *Метрологія та прилади*. 2018. Вып. № 3. С. 21-26.

37. Сторчак К.П., Макаренко А.О., Гринкевич Г.О., Примаченко В.І. Алгоритм програмної реалізації багатоантенного каналу з завадами. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації*. 2016. № 849. С. 151–158.

38. Соколов В.Ю. Електромагнітна сумісність транспортних мереж і мереж доступу технологій IEEE 802.11g і 802.15.1. *Зв'язок*. 2011. №2 (94). С. 67– 70.

39. Букин Н.П., Полстянкин Р.М., Толкунов И.А. Особенности распространения радиоволн стандарта IEEE 802.11 в частотном диапазоне 2,4 ГГц в лесном массиве при ликвидации чрезвычайной ситуации. *Системы обработки інформації : зб. наук пр.ХУПС*. 2014. Вип. 9 (125). С. 212-215.
40. Мерлак В.Ю., Д.Д. Узун, Експериментальні дослідження функціонування wi-fi маршрутизаторів в умовах перешкод. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2017. № 1(81). С. 84-89.
41. Єрохін В.Ф., Гиндич Б.А. Застосування технології ofdm у широкосмугових бездротових мережах. *Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ „КПІ”*. 2012. № 2. С. 29-36.
42. Міщенко А.О., Шишацький А.В., Бондаренко Т.В., Бігун Н.В., Ляшенко Г.Т. Аналіз використання сучасних технологій радіозв'язку у збройних силах провідних країн світу. *Системи обробки інформації*. 2019. В. 4(159). С. 50-56.
43. Ткаліч О.П., Одарченко Р.С., Устинов О.Ю., Колодинський Д.О. Оцінка адекватності моделей розповсюдження для їх використання під час визначення місцезнаходження абонентів. *Наукоємні технології*. 2015. № 2(26). С. 159-165.
44. Ткаліч О.П., Одарченко Р.С., Устинов О.Ю., Колодинський Д.О. Розрахунок зони покриття бездротової мережі Wi-Fi для визначення місцезнаходження абонентів в аеропорту. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. № 2(50). С. 88–96.
45. Пілінський В.В., Тітков Д.В., Ратушний О.С. Effective approach to the selection of mains radio frequency interference filters. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2018. № 15. С. 27-30.
46. Пілінський В.В., Ратушний О.С., Тітков Д.В. аналіз електромагнітної обстановки пристроїв інтернету речей у приміщенні. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. 2019. № 27 (1352). С. 50-54.
47. Носков В.Я. Васильев А.С., Ермак Г.П., Чупахин К.А. Флуктуационные характеристики автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2017. Т. 60, № 3. С.154-165.

48. Vasiliev A.S. et al. Signals from a moving object of autodyne radars with linear frequency modulation. *2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS). IEEE*, 2017. P. 93–98.

49. Семенко А.І., д.т.н.; Гринкевич Г.О. Потужність передавача в безпроводовій телекомунікаційній системі, необхідна для заданої помилки прийому сигналу. *Вісник ДУІКТ*. – 2013. – №2. С. 5-9.

50. Deek L., Garcia-Villegas E., Belding E., Lee S. J., Almeroth K. (2011). The Impact of Channel Bonding on 802.11n Network Management. *CoNEXT '11 Proceedings of the Seventh Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies Article*. 2011. №11. P. 1–12. doi: 10.1145/2079296.2079307.

51. Rathod K., Vatti R., Nandre M. Optimization of Campus Wide WLAN. *International Journal of Electrical Electronics & Computer Science Engineering*. 2017. №4(5). P. 1–6. DOI: 10.1145/570645.570659.

52. Sârbu A., Sârbu M., Şumălan C. Non Wi-Fi Devices Interference Testing in a 2.4 GHz Wi-Fi Home. *Land Forces Academy Review* 2018. №23(90). P. 143–150. DOI: 10.2478/raft-2018-0017.

53. Mohamed Nj, Sahib S., Suryana N., Hussin B. RTS/CTS Framework Paradigm and WLAN Qos Provisioning Methods. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2017. № 8(2). P. 176–186. DOI: 10.14569/IJACSA.2017.080224.

54. Kienle F., When N., Meyr H. On Complexity, Energy- and Implementation-Efficiency of Channel Decoders. *IEEE Transactions on Communications*. 2011. №59(12). P. 3301 – 3310. doi: 10.1109/TCOMM.2011.092011.100157.

55. Нестеренко С.А., Иванова Л.В. Аналитическая модель пропускной способности сквозного канала гетерогенного сегмента сети. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2013. № 09(85). С. 137-141.

56. Нестеренко С.А., Иванова Л.В. Аналитическая модель сквозного канала беспроводного сегмента сети IEEE 802.11. *Праці Одеського політехнічного університету*. № 01(35). С. 146-150.

57. Нестеренко С.А., Нестеренко Ю.С. (2015). Анализ пропускной способности беспроводного канала в режимах ускоренной передачи. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. № 3/9(75). С. 20-24. DOI 10.15587/1729-4061.2015.42492.
58. Kim H. Park E. C. Lee S. K. Hu C. Fast performance assessment of IEEE 802.11-based wireless networks. *Mathematical and Computer Modelling*. 2011. №53. P. 2173-2191.
59. Яриловець А.В., Назарук В.Д., Зайцев С.В. (2014) Оцінка ефективності інформаційної технології для систем безпроводового доступу, побудованої на основі оптимальних ортогональних багаточастотних сигнальних конструкцій. *Математичні машини і системи*. 2014. №2. С. 51-58.
60. Potorac A.D., Onofrei A., Balan D. (2010). An Efficiency Optimization Model for 802.11 Wireless Communication Channels. *Electronics and electrical engineering*. 2010. № 1 (97), P. 67-72.
61. Sharma R., Singh G., Agnihotri R. Comparison of performance analysis of 802.11a, 802.11b and 802.11g standard. *International Journal on Computer Science and Engineering*. 2010. Vol. 02, No. 06, P. 2042-2046.
62. Barbosa A.V., Caetano M.F., Bordim J.L. The Theoretical Maximum Throughput Calculation for the IEEE802.11 g Standard. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2011. №11/4, P. 136-143.
63. Khan M.O., Qiu L. Accurate WiFi packet delivery rate estimation and applications. *IEEE INFOCOM - The 35th Annual IEEE*. 2016. P. 1-9. DOI:10.1109/infocom.2016.7524394
64. Sen, S., Santhapuri, N., Choudhury, R.R., & Nelakuditi, S. (2010). AccuRate: Constellation Based Rate Estimation in Wireless Networks. *NSDI*. 2010. P. 1-15.
65. Інь Ч., Лазебний В.С. Аналіз результатів досліджень реальної пропускної здатності безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11. *Проблеми інформатизації та управління*. 2019. №1(61). С. 30-39.

66. Лазебний В.С. Оцінювання інформаційної пропускної здатності безпроводового каналу телекомунікаційної мережі стандарту 802.11. *Вісник ДУІКТ*. 2012. Т.10, №4. С. 72-78.

67. Лазебний В.С., Інч Ч. Оцінювання якісних показників бездротової мережі стандарту 802.11 з конкурентним доступом до каналу. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. 2018. №1(31). С. 78-88.

68. Лазебний В.С., Інч Ч., Омелянець О.О. Дослідження реальної пропускної спроможності безпроводової інформаційної мережі специфікації IEEE 802.11n, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Том 29 (68). № 5 Частина 1, С. 155-160.

69. Трубочанінова К. А., Крощенко Д. О., Метод попереднього планування безпроводової локальної мережі стандарту IEEE 802.11. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. №2. С. 27-32.

70. Талаєв О.К, Дуднік А.С., Березовський О.М. Моделювання бездротових комп'ютерних мереж в залежності від алгоритму управління та розподілу трафіку. *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: збірник наукових праць*. 2008. № 49. С. 153–156.

71. Леонтьєва О. Аналіз аналітичних моделей безпроводних мереж стандарту 802.11. *Технічні вісті*. 2010. №1(31)-№2(32). С.113-117.

72. Obelovska K. Leontyeva O. Extended wireless CSMA/CA for adaptive traffic flow control. *Технічні вісті*. 2011. №1(33)-№2(34). С.31-33.

73. Леонтьєва О. Обельовська К. Порівняння пропускних здатностей схем доступу DCF та EDCA безпроводних локальних мереж. *НУ “Львівська політехніка”: “Комп'ютерні науки та інформаційні технології”*. 2012. №744. – С.64-68.

74. Панова О., Обельовська К. Аналіз критеріїв для адаптивного управління числом категорій доступу схеми EDCA. *7 Українсько-польська науково-*

практична конференція “Електроніка та Інформаційні Технології” (ЕлІТ-2015), 27-30 серпня 2015, Львів, Чинадієво, Україна.

75. Наритник Т.М., Акоюн П.Г., Сайко В.Г., Корсун В.І., Сарапулов С.В. Порівняльна характеристика безпроводових систем стандартів 802.11 за пропускною здатністю та продуктивністю. *Вісник Університету «Україна»*. 2019. № 2 (23). С.75-87.

76. Соколов В.Ю. Порівняння можливих підходів щодо розробки низькобюджетних аналізаторів спектру для сенсорних мереж діапазону 2,4–2,5 ГГц. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2018. №2. С. 31–46.

77. Бурячок В.Л., Астапеня В.М., Соколов В.Ю. Способы повышения доступности информации в беспроводных системах стандарта IEEE 802.11 с МІМО. *Сучасний захист інформації*. 2016. №2. С. 60-68.

78. Астапеня В.М., Соколов В.Ю. Підвищення пропускної здатності безпроводових каналів зв'язку на основі поляризаційних ефектів у мережах IEEE 802.11. *Зв'язок*. 2012. №3 (99). С. 36–41.

79. Астапеня В.М., Соколов В.Ю. Використання поляризації радіохвиль для підвищення пропускної здатності та завадостійкості безпроводових каналів зв'язку мереж стандарту IEEE 802.11. *Сучасні інформаційнокомунікаційні технології (COMINFO'2012) : матеріали VIII Міжнар. наук.- техн. конф., 1–5 жовтня 2012 р. Київ : ДУТ, 2012. С. 230–232.*

80. Михалевський Д.В. Дослідження параметрів каналного та фізичного рівнів мереж стандарту 802.11. *Информационно-коммуникационные технологии в управлении : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ. 2015. Гл. 6. С. 133–152.

81. Михалевський Д.В. Особливості каналного та фізичного рівнів технології МІМО для стандарту 802.11. *Наука и инновации в современном мире: техника и технологии : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2017. Кн. 2, гл. 8. С. 125–136.

82. Михалевський Д.В. Дослідження параметрів каналного та фізичного рівнів мереж стандарту 802.11n. *Научные ответы на вызовы современности:*

техника и технологии : [кол.] монография. Одеса : Куприенко СВ, 2016. Кн. 2, гл. 3. С. 52-76.

83. Mykhalevskiy D.V. Study of channel and physical levels parameters of 802.11ac standard. The potential of modern science. Vol 3 : [coll.] monograph. London: SCIEEMCEE. 2019. P. 186–211.

84. Mykhalevskiy D.V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences.* 2019. № 1. P. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004.

85. Mykhalevskiy D.V., Kychak V.M. (2019), “Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard”. *Latvian journal of physics and technical sciences.* 2019. №2. P. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0009.

86. Mykhalevskiy D.V., Horodetska O.S. Investigation of wireless channels according to the standard 802.11 in the frequency range of 5 GHz for two subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD).* 2019. № 42(2). P. 50–57. Doi: 10.26480/jmerd.02.2019.50.57.

87. Mykhalevskiy D.V. Method for estimating the effective data rate in 802.11 channel with using monitoring algorithm. *Journal of Applied Research and Technology.* 2020. № 18(3). P. 119-128. DOI: 10.22201/icat.24486736e.2020.18.3.1089.

88. Mykhalevskiy D. Development of a spartial method for the estimation of signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. № 4/9 (88). P. 29–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106925.

89. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the input to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. № 6/9 (96). P. 16–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983.

90. Mykhalevskiy D., Vasylykivskiy N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard

receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 4/9 (88). P. 38–43. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.

92. Mykhalevskiy D. Development of the method of evaluation of effective data rate on the basis of empirical model of statistical relationship of basic parameters for the wireless channel 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 5/9 (107). P. 26–35. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.

93. D. Mykhalevskiy. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. № 6/9 (108). P. 18–24. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218720.

94. Михалевський Д.В. Розробка математичних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації у просторі приміщень для безпроводних каналів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 1. С. 110–115. DOI: 10.31649/1997-9266-2020-148-1-110-115.

95. Михалевський Д.В. Дослідження факторів впливу на оцінювання основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2020, № 6. С. 107–114. DOI: 10.31649/1997-9266-2020-153-6-107-114.

96. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Оцінка достовірності алгоритмів моніторингу для абонентських пристроїв стандарту 802.11. *Вісник ХНУ*. 2020. №6. С. 151-155. DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-151-155.

97. Михалевський Д.В. Технічна діагностика безпроводних каналів стандарту 802.11. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. № 2. С. 111–120. Doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-2-111-120.

98. Михалевський Д.В. Розробка моделі оцінювання основних параметрів безпроводного каналу стандарту 802.11 з урахуванням дестабілізуючих факторів. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. № 1. С. 59–67 Doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-1-59-67.

99. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Розробка моделі оцінювання впливу архітектурних перешкод на основні параметри безпроводного каналу

стандарту 802.11. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки.* 2020. Том 31 (70). №3. Частина 1. С. 48–53.

100. Михалевський Д.В. Розробка моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для каналів стандарту 802.11 на основі квадратичної функції. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки.* 2020. Том 31 (70) № 4. С. 25–29.

101. Михалевський Д.В. Оцінка адекватності моделей регресії в оцінюванні основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки.* 2020. Том 31 (70). №6. Частина 1. С. 16–20. DOI: 10.32838/TNU-2663-5941/2020.6/03.

102. Михалевський Д.В. Оцінка параметрів безпроводного каналу передачі інформації стандарту 802.11 Wi-Fi. *Східно-Європейський журнал передових технологій.* 2014. № 6/9 (72). С. 22-25. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31666.

103. Михалевський Д.В., Гузь М.Д., Красота Р.О. Дослідження впливу довжини пакетів верхніх рівнів на ефективну швидкість передачі для стандарту Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 2014. №4. С. 189-192.

104. Михалевський Д.В., Гузь М.Д. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 2015. №1. С. 195-199.

105. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка якості мультимедійного трафіку під час перемикання між точками доступу у мережах Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 2014. №3. С. 151-155.

106. Михалевський Д.В., Мондьяк В.Є., Красота Р.О. The research of wi-fi channel for multimedia traffic. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 2014. №2. С. 175-178.

107. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Система передачі високоякісних звукових сигналів без втрат. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2013. №3. С. 153-156.

108. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка параметрів відео зображення в телекомунікаційних системах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2013. №1. С. 201-205.

109. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при перемиканні між точками доступу. *Сборник научных трудов Sword*. 2014. Вып. 3(36), Т.6, С.56–59.

110. Михалевський Д.В., Гузь М.Д., Красота Р.О. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад. *Сборник научных трудов Sword*. 2014. Вып. 4(37). Т. 5. С.13–16.

111. Михалевський Д.В., Гузь М.Д. Оцінка розподілу потужності сигналу передавача стандарту 802.11 у приміщенні. *Сборник научных трудов Sword*. 2015. Вып. 1(38). Т. 3. С.48–52.

112. Михалевський Д.В., Номировська В.В., Постернак О.М. Оцінка розподілу потужності сигналу для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц. *Сборник научных трудов Sword*. 2015. Вып. 2(39). Т. 4. С.32–35.

113. Михалевський Д.В., Номировська В.В., Постернак О.М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного та сусіднього інтерференційного каналів для стандарту 802.11n. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. №2. С. 155-159.

114. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц. *Сборник научных трудов Sword*. 2015. Вып. 3(40), Т. 3, С.43–47.

115. Михалевський Д.В. Аналіз побудови пакетів та кадрів під час передачі інформації безпроводним каналом стандарту 802.11. *Научные труды SWorld*. 2016. Вып. 1(42). Т. 4. С. 76–82.

116. Михалевський Д.В., Крутінь А.В., Рогозіна Л.А. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11n частотного діапазону 5 ГГц.

Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2016. №2, С. 214–218.

117. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Особливості технології MIMO у стандарті 802.11. *Научные труды SWorld*. 2016. Вып. 3(44). Т. 1. С. 49–54. DOI:10.21893/2410-6720-2016-44-1-106.

118. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2016. №3. С. 172–176.

119. Михалевський Д.В., Арсенюк Д.І., Жмурко І.С. Керуючий операційний елемент у стандарті 802.11. *Сборник научных трудов Sword*. 2017. Вып. 46. Т. 1. С. 27–32. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-46.1.105.

120. Михалевський Д.В. Дослідження розподілу потужності сигналу в умовах багатопробеневого поширення хвиль для стандарту 802.11. *Сборник научных трудов Sword*. 2017. Вып. 47. Т. 1. С. 30–34. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-47.1.091.

121. Михалевський Д.В. Дослідження впливу чутливості приймачів стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. №3. С. 176–180.

122. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. *Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing. Conference Proceeding*. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine, P. 369-372.

123. Михалевський Д.В. Оцінка критерію якості для безпроводного каналу стандарту 802.11. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2015)*. Тези доповідей. 25-27 листопада 2015 р., м. Дніпропетровськ. С. 110-111.

124. Михалевський Д.В. Просторовий розподіл сигналу у приміщенні при центральному розміщенні точки доступу стандарту 802.11. *Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТ-2017)*.

Матеріали VI міжнар. наук.-техн. конференції. 28-30 червня 2017 р., Вінниця, ВНТУ. С. 40-41.

125. Михалевський Д.В. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11ac. *Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях. Матеріали VI міжнар. наук.-техн. конференції. 9-11 листопада 2017 р. Чернівці. ЧНУ ім Ю. Федьковича. С. 31.*

126. Михалевський Д.В. Дослідження просторового розподілу сигналу у приміщенні для стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції. 8-13 червня 2017 р. Одеса–Хмельницький. ОНАЗ ім. О.С. Попова–ХНУ. С. 188–189.*

127. Михалевський Д.В. Оцінка об'єму інформації для однонаправленого режиму передачі кадру у стандарті 802.11. *Математика. Інформаційні технології. Освіта. Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції. 5-7 червня 2016 р. Луцьк-Світязь. С. 90-91.*

128. Михалевський Д.В. Дослідження розподілу потужності сигналу в умовах багатопробеневого поширення хвиль для стандарту 802.11. *Modern methods, innovation, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference. Radom, Republic of Poland. December 27-28, 2017. С.47–50.*

129. Михалевський Д.В. Модель оцінки ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням параметрів моніторингу. *Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)". 14-16 листопада 2019 р. Вінниця, ВНТУ. 2019. С. 28–29.*

130. Михалевський Д.В. Розподіл потужності сигналу у приміщенні для кутового розміщення точки доступу стандарту 802.11 в діапазоні 5 ГГц. *Матеріали XIV міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)". 15-17 жовтня 2018 р. Вінниця, ВНТУ. С.1.*

131. Михалевський Д.В., Шаталюк В.О., Куць В.Й. Особливості технології МІМО у стандарті 802.11ac. *Матеріали XVI міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка» в технологічних процесах (ВОТТП-16-2016)*. 10-15 червня 2016 р. Одеса. С. 204.

132. Михалевський Д.В. Особливості моделювання безпроводного каналу стандарту Wi-Fi. *Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки. IV МНПК*. 23-25 жовтня 2014 р., Чернівці. С. 90.

133. Михалевський Д.В. Гузь М.Д., Красота Р.О. Аналіз мультимедійного трафіку для концепції цифрового будинку. *Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ – 2014»: 10-та ММНТК*. 12-17 травня 2014 р., Севастополь. С. 96.

134. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Технологія МІМО для передачі звуку високої якості без втрат. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства. XX МНПК студентів, аспірантів, та молодих учених*. Квітень 2013р. Кременчук. 2013.

135. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Передача високоякісних звукових сигналів без втрат. *Матеріали XII міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка» в технологічних процесах (ВОТТП-12-2013)*. Червень 2013р. Одеса. С. 1-2.

136. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка параметрів передачі високоякісних звукових сигналів. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2013*. Жовтень 2013р., Вінниця ВНТУ. С. 40.

137. Михалевський Д.В., Красота Р.О., Гузь М.Д. Особливості передачі мультимедійного трафіку в безпроводних мережах. *Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»*. 10 – 16 березня 2014 р. Київ. 2014. С. 169-170.

138. Михалевський Д.В., Бойко М.В. Використання технології МІМО для мережі цифрового будинку. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства. XXI*

МНПК студентів, аспірантів, та молодих учених. Квітень 2014р. Кременчук. С. 70-71.

139. Михалевський Д.В., Мондьяк В.Є., Красота Р.О. Дослідження WI-FI каналу для передачі мультимедійного трафіку. *Матеріали XIII міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка» в технологічних процесах (ВОТТІ-13-2014)*. Червень 2014р., Одеса. С. 214.

140. Михалевський Д.В. Аналіз параметрів сигналу у каналах стандарту 802.11g при спектральних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "MSATPA"*. Oct. 20-22, 2014. Dubai. P. 33-37.

141. Михалевський Д.В. Дослідження потужності сигналу приймачів сигналу WI-FI. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "TPMSPS"*. Sep. 22-24, 2014. Dubai. P. 29-31.

142. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка рівня сигналу від положення антен у просторі. *Матеріали XII Міжн. Конф. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)*. 14-16 жовтня 2014 р., ВНТУ. Вінниця.

143. Михалевський Д.В. Дослідження впливу довжини пакетів на параметри безпроводного каналу. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "The Goal of the World Science 2015"*. January 24-25, 2015. Dubai. UAE. 2015. P. 6-13.

144. Михалевський Д.В. Аналіз сигналу у каналах стандарту 802.11 при інтерференційних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Science and Education – Our Future"*. November 24-26, 2014. Abu Dhabi. UAE. P. 13-17.

145. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на пропускну здатність каналу 802.11. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Innovative technologies in science"*. February 21-22, 2015. Dubai. UAE). Vol. 1. P. 71-78.

146. Михалевський Д.В. Дослідження впливу інтерференційних каналних завад у мережах 802.11n. *Proceeding of the International Scientific and Practical*

Conference “Scientific and Practical Results in 2014”. Desember 22-24, 2014. Dubai. UAE. Vol. 1. 2014. P. 33-36.

147. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на пропускну здатність каналу стандарту 802.11 ч.2. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference “Metodology of modern reseach”*. March 21-22, 2015. Dubai. UAE. Vol. 1. 2015. P. 56-61.

148. Михалевський Д.В. Номировська В.В., Постернак О.М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного каналу для стандарту 802.11n. *Матеріали XIV міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка» в технологічних процесах (ВОТТП-14-2015)*. Червень 2015 р. м. Одеса. С. 253.

149. Михалевський Д.В. Аналіз частотного спектру діапазону 5 ГГц для сімейства стандартів 802.11x. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «The Top Actual Researches in Modern Science*. July 18-19, 2015. Ajman. UAE. Vol. I. P. 9-12.

150. Михалевський Д.В. Дослідження чутливості приймачів стандарту 802.11. *International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions*. September 24-25, 2015. Dubai. UAE. № 2(2). Vol.1. P. 87-92.

151. Михалевський Д.В. Поняття діагностики у мережах стандарту 802.11. *International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application*. October 20-21, 2015. Dubai. UAE. № 3(3). Vol.1. P. 20-21.

152. Михалевський Д.В. Наугольних Є.С. Аналіз критеріїв ефективності безпроводних мереж. *Матеріали XIV міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка» в технологічних процесах (ВОТТП-15-2015)*. Вересень 2015р. Одеса. С.80-81.

153. Михалевський Д.В., Рогозіна Л.А., Крутінь А.В., Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для каналу стандарту 802.11n у діапазоні 5 ГГц.

International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Innovative Technologies in Science). February 25 – 26, 2016. Dubai. UAE. №2(6). Vol.1. P. 66-69.

154. Михалевський Д.В. Дослідження режиму multicast у стандарті 802.11. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Methodology of Modern Research)*. March 28 – 29, 2016. Dubai. UAE. №4(8). Vol.1. P. 54-56.

155. Михалевський Д.В. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11ac. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем (MEICS-2017) : Матеріали II Всеукраїнська. наук.-техн. конференції*. 22-14 листопада 2017 р. Дніпро. ДНУ ім. О. Гончара. с. 70.

156. Михалевський Д.В. Максимчук Ю.А. Пристрій для прийому сигналів ір телебачення, із подальшим їх відображенням: патент №75146 України на корисну модель. № u2012 048; заявка 18.04.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл. №22. 4 с.

157. Михалевський Д.В. Тіщенко І.Б. Янковчук Д.О. Пристрій для аналізу частотних каналів мереж стандарту wi-fi: патент № 102699 України на корисну модель. № u2015 05419; заявка, 02.06.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 4 с.

158. Михалевський Д.В. Тіщенко І.Б. Янковчук Д.О. Пристрій для оцінки параметрів якості відеозображення: патент № 102698 України на корисну модель. № u2015 05418; 02.06.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 4 с.

159. Наугольних Є.С. Дослідження безпроводних технологій у мультисервісних мережах. *Магістерська дипломна робота зі спеціальності 8.05090302 «Телекомунікаційні системи та мережі»* - Вінниця: ВНТУ, 2014 р. 122 с.

160. Мельник В.М. Дослідження каналів безпроводних систем передачі стандарту 802.11ac. *Магістерська дипломна робота зі спеціальності 8.05090302 «Телекомунікаційні системи та мережі»* - Вінниця: ВНТУ, 2015 р. 120 с.

161. Янковчук Д.О. Підвищення ефективності методів кодування мультимедійного трафіку. *Магістерська дипломна робота зі спеціальності 8.05090302 «Телекомунікаційні системи та мережі»* - Вінниця: ВНТУ, 2017 р. 130 с.

162. Тіщенко І.Б. Дослідження методів оцінки параметрів сигналів стандарту 802.11 Wi-Fi бакалаврська дипломна робота зі спеціальності «Телекомунікації» - Вінниця: ВНТУ 2015 р
163. Красота Р.О. Дослідження параметрів безпроводного каналу стандарту Wi-Fi. *Магістерська дипломна робота зі спеціальності 8.05090302 «Телекомунікаційні системи та мережі»* - Вінниця: ВНТУ, 2015 р. 125 с.
164. Кветний Р.Н., Лисогор В.Г., Посвятенко В.П., Скидан Ю.А. Моделювання та оцінка параметрів якості зв'язку в телекомунікаційних мережах. *Монографія. Вінниця, ВНТУ, 2009. 132 с.*
165. Воробієнко П.П., Нікітюк Л.А., Резніченко П.І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: Підручник для вищих навчальних закладів. *К.: Самміт-книга, 2010. 708 с.*
166. Бельков Д.В., Єдемська Є.М. Контроль якості комп'ютерних мереж. *Наукові праці ДонНТУ. 2010. № 12(165). С. 28-33.*
167. Толюпа С.В. Метод багатокритеріального аналізу ефективності функціонування та забезпечення інформаційної безпеки інфокомунікаційних систем. *Захист інформації. 2012. № 3(56). Т.14. С. 81–86. DOI: 10.18372/2410-7840.14.3371.*
168. Стеценко І.В. Моделювання систем: навч. посіб. *Черкас. держ. технол. ун-т, Черкаси : ЧДТУ. 2010. 399 с.*
169. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. *СПб.: Питер. 2012. 943 с.*
170. Бабич А.В. Организация информационных сетей. Учебное пособие. *Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2010. 144 с.*
171. Юдицкий С., Подлазов В., Борисенко В. Искусство диагностики локальных сетей. *LAN/журнал сетевых решений. 1998. №07-08.*
172. Юдицкий С., Борисенко В., Овчинников О. Основы диагностики сети. *LAN/журнал сетевых решений. 1998. №12.*

173. Моисеев А.Л., Моисеева Р.Р., Шаров В.В., Зацаринная Ю.Н. Методы тестирования и диагностирования компьютерных сетей. *Вестник Казанского технологического университета*. 2017. № 1, Т.12, с. 315-316.

174. Ю.І. Хлапонін, Г.Б. Жиров. Аналіз та моніторинг телекомунікаційної мережі на основі інтелектуальних технологій. *Papers of the XVI International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2016)*, Kyiv, Ukraine, 2016. С. 32-39.

175. IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications--Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz.," in *IEEE Std 802.11ac(TM)-2013 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012, IEEE Std 802.11aa-2012, and IEEE Std 802.11ad-2012)*. 18 Dec. 2013. Pp.1-425. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.7797535.

176. Шемшученко Ю.С. та ін. Моніторинг. Юридична енциклопедія : у 6 т. К. : Українська енциклопедія ім. М. П. Бажана, 2001. Т. 3, 792 с. ISBN 966-7492-03-6.

177. Гузій М.М., Станіславова О.В., Кадет М.В., Аналіз технологій моніторингу комп'ютерних мереж. *Наукоємні технології*. 2009. №1. Т.1. С. 44-45. DOI: 10.18372/2310-5461.1.5091.

178. Fedevych O., Droniuk I., Nazarkevych M., Monitoring and analysis of measured and modeled traffic of TCP/IP Networks. *Communications in Computer and Information Science*. 2016. Vol. 608. Springer Int. Publishing Switzerland. P. 32-41.

179. Дронюк І.М., Федевич О.Ю. Прогнозування трафіку комп'ютерних мереж для підвищення ефективності використання мережевого обладнання. *Наук. вісн. НЛТУ України*. 2015. Вип. 25.5. С.301-307.

180. Дронюк І.М., Федевич О.Ю. Програмний комплекс моніторингу та прогнозування трафіку потоку в сегменті комп'ютерної мережі. *Наук. вісн. НЛТУ України*. 2015. Вип. 25.10. С.295-301.

181. Шон Дейли. Мониторинг сети с AD. «Windows IT Pro/RE». 2000. В. №06. Электронный ресурс. Режим доступа <https://www.osp.ru/winitpro/2000/06/174396/>.
182. Бобало Ю.Я., Даник Ю.Г., Комарова Л.О. та інші. Моніторинг об'єктів в умовах апіорної невизначеності джерел інформації. Монографія. *НУ Львівська політехніка. Львів. 2015. 360с.*
183. Торошанко Я.І., Булаковська А.О., Височіненко М.С., Шматко В.С. Задачі моніторингу та аналізу параметрів телекомунікаційних мереж. *Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2014. №3. С. 62-69.*
184. Cui Y., Xiao S., Liao C., Stojmenovic I., Li M. Data Centers as Software Defined Networks: Traffic Redundancy Elimination with Wireless Cards at Routers. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications. December 2013. Vol. 31, № 12. P.1-15.*
185. Высочина О.С., Шматков С.И., Салман Амер Мухсин. Анализ систем мониторинга телекоммуникационных сетей. *Радиоэлектроника, информатика, управління. 2010. № 2. С. 139-142.*
186. Сторожук Д.О. Методы и алгоритмы для систем мониторинга локальных сетей. М. 2008. 121 с.
187. Биченко Д.І., Лаврут О.О. Підвищення якості і надійності роботи військових телекомунікаційних мереж за рахунок використання програми моніторингу їх стану. *Системи озброєння і військова техніка. 2016. № 2(46). С. 13-16.*
188. Бовда Е.М. Модель моніторингу та прогнозування стану телекомунікаційної мережі з використанням нечітких нейронних мереж. *Збірник наукових праць ВІТІ. 2018. № 1. С. 6-16.*
189. Стив Штайнке. Оптимизация распределения пропускной способности *Журнал сетевых решений/LAN. 1999. № 02. <https://www.osp.ru/lan/1999/02/133971/>*
190. Бойченко М.К., Иванов И.П. Мониторинг ресурсов узлов корпоративной сети. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. №2. С 114-120.*

191. Коноваленко С.А., Королев И.Д. Анализ систем мониторинга вычислительных сетей. *Молодой учёный*. 2016. № 23 (127). С. 66-72.
192. Гайфулин Т.А., Костомаров Д.С. Анализ современных систем мониторинга. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2013. Вып. 9. Ч.2. С. 51-55.
193. Костенко Е.Ю., Дуйсенгалиев Р. Р., Барабанова Е. А. Система мониторинга для контроля трафика технологических сетей передачи данных. *Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2015. №4. С. 101-109.
194. Когай Г.Д., Амиров А.Ж., Каюмов Д.С. Исследование проблем коммуникационных протоколов в локальной компьютерной сети типа Ethernet и АТМ при построении локальных вычислительных сетей. *Международный научно-исследовательский журнал. Технические науки*. 2005. №4 (35) Ч. 1 С.71-73.
195. Костенко П.П. Система моніторингу мережної активності користувачів ОС WINDOWS 7/8. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2015. Вып. 3/(92). С. 60-66.
196. Chunaryova A.V. Modern methods of auditing and monitoring of information security problems. *Problems of information and management*. 2013. no. 3(43). P. 87–91.
197. Angrisani L., Capriglione D., Ferrigno L., Miele G. A Methodological Approach for Estimating Protocol Analyzer Instrumental Measurement Uncertainty in Packet Jitter Evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012. Vol. 61. Iss. 5. P. 1405–1416.
198. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. 4-е изд., испр., М.: Горячая линия – Телеком. 2015. 640 с.. ISBN 978-5-9912-0479-8.
199. Киселев Д.Н., Перфилов О.Ю. Радиомониторинг и распознавание радиоизлучений. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия - Телеком, 2015. 90 с. ISBN 978-5-9912-0490-3.

200. Alfarhan K.A., Mashor M.Y., Saad A.R.M.A review of wireless ecg monitoring systems design. *International Academy of Engineering and Medical Research*. 2016. Vol. 1. Iss. 2. P. 1-8.

201. Albert Höglund. Advanced Mobile Network Monitoring and Automated Optimization Methods. *Systems Analysis Laboratory Research Reports*. A95, March 2006. 28p.

202. Bezruk V., Fedorov A., Nemec Z. Detecting unknown signals in radio monitoring systems. *27th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. 2017. P.1-4. Doi: 10.1109/RADIOELEK.2017.7937604.

203. Maitland C.F., Caneba R., Schmitt P. Koutsky, T. A cellular network radio access performance measurement system: Results from a Ugandan Refugee Settlements Field Trial. *46th annual meeting of the Research Conference on Communications, Information and Internet Policy (TPRC)*. Sept. 21-22, 2018. Pp. 1-12.

204. Yuanjie Li, Chunyi Peng, Zengwen Yuan, Jiayao Li, Haotian Deng, Tao Wang. MobileInsight: Extracting and Analyzing Cellular Network Information on Smartphones. *In MobiCom 16*. 2016. P.39-42.

205. Ashkan Nikraves, Hongyi Yao, Shichang Xu, David Choffnes, and Z. Morley Mao. Mobilyzer: An open platform for controllable mobile network measurements. *Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. 2015. P. 389–404. doi: 10.1145/2742647.2742670.

206. Clayton Shepard, Ahmad Rahmati, Chad Tossell, Lin Zhong, and Phillip Kortum.. LiveLab: Measuring Wireless Networks and Smartphone Users in the Field. *SIGMETRICS Perform.* 2011. Eval. Rev. № 38. V. 3. P. 15–20. doi: 10.1145/1925019.1925023.

207. Narseo Vallina-Rodriguez, Andrius Aućinas, Mario Almeida, Yan Grunenberger, Konstantina Papagiannaki, and Jon Crowcroft.. RILAnalyzer: A Comprehensive 3G Monitor on Your Phone. *In Proceedings of the 2013 Conference on Internet Measurement Conference (IMC'13)*. 2013. P. 257–264. doi: 10.1145/2504730.2504764.

208. Dong-Hoon Shin, Saurabh Bagchi. Optimal Monitoring in Multi-Channel Multi-Radio Wireless. *MobiHoc'09*. May 18–21, 2009. New Orleans, Louisiana, USA. P. 1-10.

209. Lopatka J., Gajewski P., Malon K., Krygier J. Performance monitoring of cognitive radio mobile ad hoc network with dynamic spectrum access. *2017 IEEE AFRICON*, Cape Town. 2017. P. 297-302.

210. Checinski R., Kaszuba-Checinska A., Kryk M., Lopatka J., Malon K., Skokowski P. Performance Analysis of the Cognitive Radio Network with Opportunistic Spectrum Access. *INTL journal of electronics and telecommunications*. 2018. Vol. 64. №. 1. P. 51-56. Doi: 10.24425/118146.

211. (2002) Radio Network Monitoring. In: Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS. *Springer, Boston, MA*. 2002. P. 211-222. DOI:10.1007/0-306-47319-4_9.

212. Madhuram Mishra, Anjali Potnis. Wireless Transmission Detection and Monitoring System using GNU Radio and Multiple RTL. *SDR Receivers Int. Journal of Engineering Research and Application*. July, 2017. Vol. 7. Iss. 7. (Part -1). P.70-76.

213. Ільницький А.І., Бурба О.І., Пасічник О.О. Статистичні характеристики інформаційних ознак джерел випромінювання при радіомоніторингу телекомунікаційних мереж. *Управляючі системи і машини*. 2016. № 6. С. 48-58.

214. Воробієнко П.П., Нікітюк Л.А., Резніченко П.І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: Підручник для вищих навчальних закладів. *К.: Самміт-книга*. 2010. 708 с.

215. Wescott D.A., Coleman D.D., Mackenzie P., Miller B. CWAP Certified Wireless Analysis Professional Official Study Guide: Exam PW0-270. *Wiley Technology Pub*. 2011. 712 p.

216. Pejman Roshan, Jonathan Leary. 802.11 Wireless Local-Area Network Fundamentals. *Cisco Press*. 2004. 304 p.

217. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.Л., Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592с.
218. Roshan P., Leary J. 802.11 Wireless LAN Fundamentals. *Cisco Press*, 2003. 312 p.
219. Sankar K., Sundaralingam S., Balinsky A., Miller D. Cisco Wireless LAN Security. *Cisco Press*. 2004. 456 p.
220. Vanhoef M., Piessens F. Practical Verification of WPA-TKIP Vulnerabilities. *ASIA CCS '13. New York*. 2013. Pp. 427-436.
221. Perahia E., Stacey R. (2013). Next generation wireless LANs: 802.11n and 802.11ac. *Cambridge: Cambridge University Press*. 2013. 478 p.
222. Gast M. S. 802.11ac: a survival guide. *O'Reilly*. 2013. 154 p.
223. Silva P.F., Richter P., Talvitie J., Laitinen E., Lohan E.S. Challenges and solutions in Received Signal Strength-based seamless positioning. *Geographical and Fingerprinting Data to Create Systems for Indoor Positioning and Indoor/Outdoor Navigation*. 2019. P.249-285 DOI: [10.1016/B978-0-12-813189-3.00013-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813189-3.00013-7)
224. Gong M.X., Perahia E., Stacey R., Want R., Mao S.. A CSMA/CA MAC protocol for multi-user MIMO wireless LANs. *In Proc. IEEE GLOBECOM*. 2010. Miami. FL. Dec. 2010. P.1-6.
225. Ali Ahmad Milad, Zul Azri Bin Muhamad Noh, Abdul Samad Shibghatullah, Mustafa Almahdi Algaet. Reverse Direction Transmission in Wireless Networks: Review. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013. №18 (6). P. 767-778.
226. Бортник Г. Г. , Кичак В. М. Основи теорії передачі інформації. Навчальний посібник. *МО і науки України. Вінниця: ВДТУ*. 2002. 128 с.
227. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2007). *IEEE Std 802.11-2007, Int. 2007-06-12. IEEE*. 1076 p.
228. IEEE 802.11a-1999 – IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11:

Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band. *IEEE*. Pub. 1999. Reaf. 2003. 528 p.

229. IEEE Std 802.11n-2009. Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput / *Int.2009-10-29. New York : IEEE*. 2009. 536 p.

230. Nader Al-Ghazu. A Study of the Next WLAN Standard IEEE 802.11ac Physical Layer. *Master of Science Thesis, Stockholm, Sweden*. 2013. 59 p.

231. IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment Enhancements for High Efficiency WLAN. in *IEEE P802.11ax/D4.0, IEEE*. 2019. 746 p,

232. Geier G. Wireless networks first-step. *Cisco Press*, 2004. 264 p.

233. Bononi L., Conti M., Gregori E. Design and Performance Evaluation of an Asymptotically Optimal Backoff Algorithm for IEEE 802.11 Wireless LANs. *Proc. Hawaii Int'l Conf. System Sciences*. 2002. P. 1-10.

234. Bokyung Y.A., Hyung S.K. Scheme Improving Performance of IEEE 802.11 Multicast. *Protocol INNOV 2012: The First International Conference on Communications, Computation, Networks and Technologies IARIA*. 2012. P. 15-18.

235. Chandra R., Karanth S., Moscibroda T., Navda V., Padhye J., Ramjee R., L. Ravindranath. DirCast: A practical and efficient Wi-Fi multicast system. *Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*. 2009. P. 161–170.

236. Pang R., Allman M., Bennett M., Lee J., Paxson V., Tierney B. A first look at modern enterprise traffic. *Proc. 5th ACM Internet Measurement Conf. (IMC '05): USENIX Association*. 2005. P. 15-28.

237. Гавриленко В.Г., Яшнов В.А. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи. *Нижний-Новгород*. 2003. 148 с.

238. Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands. *IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor 1-2005 Part 16, Int. 2006-03-06. IEEE*. 2006. 822 p.

239. Сундучков А.К., Остропуцкая Е.А., Фадеева Е.А., Сундучков К.С. Межканальная интерференция и метод оценки ее влияния на прием сигнала. *Электроника и связь*. 2010. № 4. С. 202–206.
240. Пелішок В.О. Вибір виду модуляції для забезпечення основних вимог в безпроводних системах. *Наукові записки УНДІЗ*. 2009. № 2 (10). С. 25–31.
241. Васильев В.Г. Технология широкополосного беспроводного доступа WiMAX стандарта IEEE 802.16-2004. *Юнидата*. 2009. 91 с.
242. Jekabsons G., Kairish V., Zuravlyov V. An Analysis of Wi-Fi Based Indoor Positioning Accuracy. *Scientific Journal of Riga Technical University*. 2011. V. 47. P. 131-137.
243. Shchekotov M. Indoor Localization Method Based on Wi-Fi Trilateration Technique. *Proceeding of the 16th conference of fruct association*. 2014, 27-31 October. P. 177-179.
244. Bobescu B., Alexandru M. Mobile Indoor Positioning Using Wi-Fi Localization. *Review of the AirForce Academy, Brasov, Romania*. 2015. No. 1 (28). P. 119-122.
245. Chrysikos T., Kotsopoulos S. Site-specific Validation of Path Loss Models and Large-scale Fading Characterization for a Complex Urban Propagation Topology at 2.4 GHz. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. Mr. 13-15, 2013. Vol II. P. 1-6.
246. Wireless Sensor Networks project team. Internet of Things: Wireless Sensor Networks. *IEC White paper*. 2014. P. 1-78.
247. Mats A. Short range low power wireless devices and Internet of Things (IoT). *U-blox AG White paper*. 2015. P. 1-15.
248. Li M., Yang B. A survey on topology issues in wireless sensor network. *Proceedings of the international conference on wireless networks (ICWN'06)*. 2006. P. 1-7.
249. Ding N., Wagner D., Chen X., Pathak A., Hu Y. C., Rice A. Characterizing and modeling the impact of wireless signal strength on smartphone battery drain. *Sigmatrics*. 2013. P. 1-12.

250. Foster K. Radiofrequency exposure from wireless LANs utilizing Wi-Fi technology. *Health Physics In press*. 2007. P. 280-289.
251. Кшиштоф, В. Системы подвижной радиосвязи. Пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: *Горячая линия-Телеком*. 2006. 536 с.
252. Foschini G.J., Gans M.J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas. *Wireless Personal Communications*. 1998. №6. P. 311–335.
253. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. М.: *Горячая линия – Телеком*. 2014. 244с.
254. Rani S., Talwar R., Malhotra J., Ahmed S., Sarkar M., Song H. A Novel Scheme for an Energy Efficient Internet of Things Based on Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2015. T.15. №. 11. P. 28603-28626. doi: 10.3390/s151128603.
255. Сахно Є.Ю., Дорош М.С., Ребенок А.В. Менеджмент сервісу: теорія та практика: навч. посіб. К.: *Центр учбової літератури*. 2010. 328 с. ISBN 978-966-364-948-1.
256. Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондареко А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. Киев: *ЭКМО*. 2009. – 672 с.
257. Рихальський О. Р. Оцінка впливу діаграми спрямованості антени на якість передачі інформації в системах рухомого зв'язку стандарту GSM. *Інформаційні системи*. 2013. С. 122-135.
258. Мелихов С.В., Кологривов В.А. Оценка чувствительности радиоприемников с настроенными антеннами. *Доклады ТУСУРа*. 2006. № 6. С. 63–67.
259. Якимов А.Н., Андреев П.Г., Князева В.В. Моделирование распространения электромагнитных волн в помещении с учетом влияния местных предметов. *Журнал радиоэлектроники*. 2015. №2. С. 1-14.
260. Khalid F., Speidel J. Advances in MIMO techniques for mobile communications – A survey. *Int. J. Commun. Netw. Syst. Sci*. 2010. Vol. 3. No. 3. P. 213-252.

261. Киселев Д.Н., Перфилов О.Ю. Радиомониторинг и распознавание радиоизлучений: учеб. пособ. М.: Горячая линия – Телеком. 2015. 90 с. ISBN 978-5-9912-0490-3.
262. Ільницький А.І., Бурба О.І., Пасічник О.О. Статистичні характеристики інформаційних ознак джерел випромінювання при радіомониторингу телекомунікаційних мереж. *Управляющие системы и машины*. 2016. № 6. С. 48–58.
263. Afridi M.A. Microstrip Patch Antenna – Designing at 2.4 GHz Frequency. *Biological and Chemical Research*. 2015. Vol. 2015. – Pp. 128-132.
264. Горбатий І.В. Дослідження технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж при використанні різних методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 1. С. 18-23.
265. Kang D.H., Sung K.W., Zander J. Attainable user throughput by dense Wi-Fi deployment at 5 GHz. *Proc of IEEE PIMRC*. 2013. P. 3418 – 3422.
266. Прокис Д. Цифровая связь. Под ред. Д.Д. Кловского. Москва: Радио и связь. 2000. 800 с.
267. Kychak V.M., Tromsyuk V.D. Assessment Method of Parameters and Characteristics of Bit Errors. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. № 49 (5). P. 59–71. doi: 10.1615/jautomatinfscien.v49.i5.50
268. Hertoghs Y., Maglione R. Multi-Service Broadband Network Architecture. *Broadband Forum Marketing Report, MR-316*. 2014. Issue 1, P. 1-22.
269. Insam E. TCP/IP Embedded Internet Applications. Newnes. Elsevier Ltd. Oxford. 2003. P. 328. doi : 10.1016/B978-0-7506-5735-8.X5026-7.
270. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 802.11n-2009. *IEEE*. 2009. 90 p.
271. W.N. van Wieringen. Lecture notes on ridge regression. *arXiv preprint arXiv:1509.09169v6*. 2020. 118 p.

272. Міхеєнко Л.А. Хвильові вимірювання. Навчальний посібник з дисципліни “Оптичні вимірювання”, частина III: [по напрямку підготовки “Оптико-електронне приладобудування”]. Київ. 2011. 64 с.

273. Одарченко Р.С. Використання моделі Хата для оцінки швидкості передавання даних по каналах антенних систем МІМО всередині приміщень. *Системи озброєння і військова техніка*. 2013. № 2(34). С. 132-138.

274. Mahanti A., Carlsson N., Williamson C., Arlitt M. Ambient Interference Effects in Wi-Fi Networks. *NETWORKING 2010. Springer Science + Business Media*. 2010. P. 160 -173. doi:10.1007/978-3-642-12963-6_13.

275. Gummadi R., Wetherall D., Greenstein B., Seshan S. Understanding and mitigating the impact of RF interference on 802.11 networks. *Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications – SIGCOMM '07. Association for Computing Machinery (ACM)*. 2007. P. 385-396. doi:10.1145/1282380.1282424

276. Andjamba T.S., Zodi G-A.L., Jat D.S. Interference analysis of ieee 802.11 wireless networks: A case study of Namibia university of science and technology. *International Conference on ICT in Business Industry & Government (ICTBIG)*. 2016. Pp 1–5. DOI: 10.1109/ICTBIG.2016.7892726

277. Архипкин В. Я., Мешковский К. А. Сравнительная помехозащищённость систем связи с широкополосными и узкополосными сигналами. *Информация и космос*. 2004. №3. С. 23-27.

278. Чепел Л., Титтел Э. TCP/IP. Учебный курс: Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург. 2003. 976 с.

279. Сундучков А.К., Фадеева Е.А., Яцук А.В., Сундучков К.С. Скорость передачи, межканальные и межсимвольные искажения. *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*. 2 010. № 680. С. 102-109.

280. Ландау Л., Лифшиц Е. Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10 т. Т. 2. Теория поля. М: Наука. 1988. 512с.

281. Жоюю П. Фарук Х. Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона. *Электроника*. 2010. №3. С. 86-94.
282. 802.11ac MU-MIMO: Bridging the MIMO Gap in Wi-Fi. *Qualcomm Atheros Inc.* January, 2015. 14 p.
283. Kryvinska N., Auer L., Zinterhof P., Strauss C. Architectural model of enterprise multiservice network maintaining mobility. *Networks 2008 - The 13th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium*. Budapest. 2008. P. 1-8. doi: 10.1109/NETWKS.2008.6231310.
284. Власов И.И., Новиков Э.В., Птичников М.М., Сладких Д.В. Техническая диагностика современных цифровых сетей связи. Основные принципы и технические средства измерений параметров передачи для сетей PDH, SDH, IP, Ethernet и ATM : Под ред. М. М. Птичникова. М.: Горячая линия. Телеком. 2012. 480 с. ISBN 978-5-9912-0195-7.
285. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. Под ред. В.С. Фигурнова. М.: ИНФРА-М. 1998. 528 с.
286. Літнарівч Р. М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу. Навчальний посібник. МЕНУ. Рівне. 2011. 140 с.
287. Бакарджиев Р.О., Комаров А.О., Особливості оцінки результатів регресійного аналізу. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2015. №5. Вип. 28. С. 237-244.
288. Sarstedt M., Mooi E. Regression Analysis. *Business and Economics*. 2014. P. 193-233. DOI: 10.1007/978-3-642-53965-7_7.
289. Cai T.T., Guo Z. Confidence intervals for high-dimensional linear regression: minimax rates and adaptivity. *The Annals of Statistics*. 2017. Vol. 45. No. 2. P. 615–646.
290. Qadar N., Khan J., Farooq U., Mufti N. Investigating the Effects of Microwave Oven on the Performance of Wi-Fi Network. *12th International Conference on Frontiers of Information Technology*, Islamabad. 2014. P. 34-36. DOI: 10.1109/FIT.2014.15

291. Цуранов М.В. Комплексний показник оцінки ефективності перешкодостійких кодів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. № 2(19). С. 101-104.

292. H.K. Rath, S. Timmadasari, B. Panigrahi and A. Simha. Realistic indoor path loss modeling for regular WiFi operations in India. *Twenty-third National Conference on Communications (NCC), IEEE*. 2017. P. 1-6, doi: 10.1109/NCC.2017.8077107.

293. Чернега В. Оценка эффективной скорости передачи данных в сетях Wi-Fi при наличии коллизий. *Беспроводные технологии*. 2017. №4. С. 44 – 46.

Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник технічної служби
Вінницької філії ВАТ Укртелеком


Л. Ф. Мінов
«26» фіося 2021 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
«Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж»
доцента кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету Михалевського Дмитра Валерійовича

Ми, комісія у складі начальника технічної служби Вінницької філії ПАТ «Укртелеком» Мінова Л.Ф., начальник цеху ядра мережі Вінницької філії ПАТ «Укртелеком» Герасимлюка В. В, завідувача кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету Кичака В.М. та професора кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету Бортника Г.Г. склали цей акт про те, що на ПАТ Укртелеком впроваджено розроблені автором методи та моделі оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Запропоновані методи та моделі оцінювання дали можливість оперативного налаштування телекомунікаційного радіообладнання та досягнення максимально-можливої продуктивності радіоканалів до певного типу приміщення із врахуванням різного роду факторів впливу. Можливість використання будь-якого обладнання для методів оцінювання робить їх економічно привабливими.

Начальник цеху ядра мережі

Вінницької філії ПАТ «Укртелеком»



Герасимлюк В. В.

Завідувач кафедри ТКСТБ, д.т.н., проф.



В.М. Кичак

Професор кафедри ТКСТБ, к.т.н.



Г.Г. Бортник

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Директор ЦТОЕ №2
ТОВ "АТРАКОМ"

к.т.н., О.С. Стец

08.12.2020

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
«Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж»
Михалевського Дмитра Валерійовича

Розглянуті результати дисертаційної роботи Михалевського Дмитра Валерійовича, запропоновано для використання в ЦТОЕ №2 ТОВ "АТРАКОМ", а саме:

- метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача, який, враховує процеси поширення сигналів та внутрішні і зовнішні фактори впливу в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для забезпечення неперервної оптимізації покриття мережі радіодоступу у приміщенні із мінімальними інформаційними втратами.

- метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, який, базується на поєднанні методів моніторингу та статистичного аналізу із використанням програмно-апаратних засобів спеціалізованих або абонентських приймальних пристроїв, що дало змогу покращити результативність управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах радіодоступу.

- узагальнені інтегральні показники факторів впливу у радіоканалах, на основі еталонних моделей середньостатистичних значень в межах покриття мереж радіодоступу, що дають можливість оцінювати дію факторів впливу на основні параметри радіоканалів, як окремо так і комплексно.

впровадженні в практичну роботу ЦТОЕ №2 ТОВ "АТРАКОМ"

Даним актом ЦТОЕ №2 ТОВ "АТРАКОМ", в особі директора Стеця О.С., підтверджує, впровадження вказаних наукових результатів, на основі яких, вдалось покращити технічні параметри внутрішньої корпоративної мережі.

Директор ЦТОЕ №2 ТОВ "АТРАКОМ"

к.т.н., О.С. Стец





АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Михалевського Дмитра Валерійовича
«Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і
характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж»

Цим актом підтверджується використання наукових положень і результатів дисертаційних досліджень Михалевського Дмитра Валерійовича у ПрАТ «Хмельницька швейна фабрика «Лілея», а саме:

- метод оцінювання просторового розподілу потужності сигналу на вході приймача, який, враховує процеси поширення сигналів та внутрішні і зовнішні фактори впливу в радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для забезпечення неперервної оптимізації покриття мережі радіодоступу у приміщенні із мінімальними інформаційними втратами.

- метод визначення ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж, який, базується на поєднанні методів моніторингу та статистичного аналізу із використанням програмно-апаратних засобів спеціалізованих або абонентських приймальних пристроїв, що дало змогу покращити результативність управління ресурсами в програмно-конфігурованих мережах радіодоступу;

- запропоновано метод оцінювання гарантованої пропускної здатності радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж для передачі різних типів трафіку, який, використовує статистичний зв'язок між параметрами радіоканалу, що дало змогу збільшити швидкодію обробки результатів під час початкової оптимізації мережі на етапах проектування.

На основі запропонованих методів оцінювання параметрів та характеристик корпоративної телекомунікаційної мережі вдалося оптимізувати покриття корпоративної мережі радіодоступу та покращити технічні показники радіоканалів на території ПрАТ «Хмельницька швейна фабрика «Лілея».

ДИРЕКТОР ПрАТ «Лілея»



МАТЮХ А.В.



Затверджую
Перший проректор з наукової роботи
та міжнародного співробітництва
Вінницького національного
технічного університету
д.т.н., проф. Грабко В.В.
" 16 " 02 2021 р.

АКТ

Про використання результатів докторської дисертаційної роботи Михалевського Дмитра Валерійовича **«Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж»**

Комісія у складі начальника науково-дослідної частини, к.т.н., доцента Богачука В.В., завідувача науково-організаційним відділом Пашенко М.І., завідувача кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Кичака В.М., склала акт про те, що у держбюджетних науково-дослідних роботах: «Розробка методів і пристроїв первинного цифрового оброблення високочастотних сигналів для систем радіоелектронної боротьби» (2016-2017 рр., № держреєстрації 0116U004710, виконавець), «Методи та пристрої формування, оброблення й вимірювання сигналів радіоінформаційних систем промислових і військових об'єктів» (2017-2019 рр., № держреєстрації 0117U007139, виконавець), «Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу» (2019-2021 рр. № держреєстрації 0119U000296, виконавець) використані результати дисертаційної роботи Михалевського Дмитра Валерійовича на тему **«Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж»:**

- метод просторового оцінювання потужності сигналу на вході приймача, для знаходження максимально-можливого покриття мережі радіодоступу при якому інформаційні втрати будуть мінімальні;
- метод оцінювання ефективної швидкості передачі інформації у радіоканалах корпоративних телекомунікаційних мереж для отримання оптимальних технічних параметрів при існуванні різного роду факторів впливу у корпоративних приміщеннях;
- інформаційна модель радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж із врахуванням повного циклу передачі кадру, яка, враховує побудову пакету, технологію агрегації кадрів, кількість втрачених кадрів, цикли повторної передачі кадрів та кількість активних радіоканалів у мережі, що дає можливість прогнозування кількості корисної інформації у радіоканалі при врахуванні різного роду технологій та кількості активних абонентів у мережі на основі специфікацій стандартів.
- моделі оцінювання потужності сигналу на вході приймача, які, враховують геометричні розміри приміщення, кутове і центральне положення точки доступу та інтервал флуктуацій, що дає можливість оцінювати розподіл сигналу безпосередньо у просторі приміщення та його залежність від статичних і випадкових факторів впливу.

Члени комісії:

Богачук В.В.

Пашенко М.І.

Кичак В.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з науково-педагогічної роботи
та організації освітнього процесу

Вінницького національного
технічного університету

к.т.н., доцент Петров О.В.

«07» 04 2021р.

АКТ

**про використання результатів докторської дисертаційної роботи Михалевського
Дмитра Валерійовича на тему
«Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик
радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж», у навчальному процесі
кафедри телекомунікаційних систем та телебачення**

Комісія у складі Тимчика С.В. (голова комісії), Васильківського М.В., Кичака В.М., Бортника Г.Г. (членів комісії) підтверджує, що в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного університету використано результати дисертаційної роботи Михалевського Д. В. «Методологія підвищення ефективності оцінювання параметрів і характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж», а саме:

- розроблено цикл лекцій та практичних робіт з дисципліни «Телекомунікаційні системи NGN та мультисервісні системи наступних поколінь», в якому вивчаються методи та засоби аналізу, оцінювання та побудови параметрів та характеристик мереж радіодоступу 5G/Wi-Fi для студентів магістрів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

- розроблено новий розділ лекційного курсу та лабораторних робіт до нього з дисципліни «Аналіз і синтез радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій», в якому вивчається теорія оцінювання параметрів та характеристик радіоканалів корпоративних телекомунікаційних мереж 5G/Wi-Fi для отримання нових знань про роботу радіоканалів в умовах приміщень і дію факторів впливу на їх параметри для студентів магістрів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

- при розробці курсових, бакалаврських і магістерських дипломних робіт, в межах індивідуальних завдань, що пов'язанні із вирішенням задач підвищення технічної та економічної ефективності корпоративних телекомунікаційних мереж, використовуються методики оцінювання із імітацією факторів впливу та врахування геометричних розмірів приміщень та моделі оцінювання для розрахунків і математичного моделювання параметрів радіоканалів.

Голова комісії

Декан ФІРЕН, к.т.н., доцент

С.В. Тимчик

Члени комісії:

Заступник декана з НМР, к.т.н.

М.В. Васильківський

Завідувач кафедри ТКСТБ, д.т.н., проф.

В.М. Кичак

Проф. кафедри ТКСТБ, к.т.н., проф.

Г.Г. Бортник

Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Колективні монографії:

21. Михалевський Д.В. Дослідження параметрів каналного та фізичного рівнів мереж стандарту 802.11. *Информационно-коммуникационные технологии в управлении : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2015. Гл. 6. С. 133–152.

22. Михалевський Д.В. Особливості каналного та фізичного рівнів технології МІМО для стандарту 802.11. *Наука и инновации в современном мире: техника и технологии : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2017. Кн. 2, гл. 8. С. 125–136.

23. Михалевський Д.В. Дослідження параметрів каналного та фізичного рівнів мереж стандарту 802.11n. *Научные ответы на вызовы современности: техника и технологии : [кол.] монография*. Одесса : Куприенко СВ, 2016. Кн. 2, гл. 3. С. 52-76.

24. Mykhalevskiy D.V. Study of channel and physical levels parameters of 802.11ac standard. *The potential of modern science. Vol 3: [coll.] monograph*. London: SCIENCE, 2019. Pp. 186–211. (British library catalogue).

Статті у журналах, що входять до наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:

25. D.V. Mykhalevskiy. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2019, № 1. Pp. 41–51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004. (Журнал індексується Scopus, Web of Science та ще 39 баз).

26. D.V. Mykhalevskiy, V.M. Kychak (2019), “Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard”, *Latvian journal of physics and technical sciences*, №2, Pp. 41–51.

DOI: 10.2478/lpts-2019-0009. (Журнал індексується Scopus, Web of Science та ще 39 баз).

27. D.V. Mykhalevskiy, O.S. Horodetska. Investigation of wireless channels according to the standard 802.11 in the frequency range of 5 GHz for two subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD)*, № 42(2), pp. 50–57. 2019. Doi: 10.26480/jmerd.02.2019.50.57. (Журнал індексується Scopus, Open Access).

28. D.V. Mykhalevskiy. Method for estimating the effective data rate in 802.11 channel with using monitoring algorithm. *Journal of Applied Research and Technology*, № 18(3), 2020, Pp. 119-128. DOI: 10.22201/icat.24486736e. 2020.18.3.1089 (Журнал індексується Scopus, Open Access).

29. D. Mykhalevskiy. Development of a spartial method for the estimation of signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, № 4/9 (88). Pp. 29–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106925. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

30. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the input to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. № 6/9 (96). P. 16–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983 (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

31. D. Mykhalevskiy, N. Vasylykivskiy, O. Horodetska. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 4/9 (88), pp. 38–43. 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

32. D. Mykhalevskiy. Development of the method of evaluation of effective data rate on the basis of empirical model of statistical relationship of basic parameters for the wireless channel 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 5/9 (107), pp. 26–35. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.

(Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

33. D. Mykhalevskiy. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, № 6/9 (108), pp. 18–24. 2020. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218720. (Наукове фахове видання кат. А, індексується Scopus, EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

Статті у наукових фахових виданнях України:

34. Михалевський Д.В. Розробка математичних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації у просторі приміщень для безпроводних каналів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2020, № 1. С. 110–115. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-110-115> (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

35. Михалевський Д.В. Дослідження факторів впливу на оцінювання основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2020, № 6. С. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-153-6-107-114> (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

36. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Оцінка достовірності алгоритмів моніторингу для абонентських пристроїв стандарту 802.11. *Вісник ХНУ*. 2020. №6. С. 151-155. DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-151-155.

37. Михалевський Д. В. Технічна діагностика безпроводних каналів стандарту 802.11. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. № 2. С. 111–120. Doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-2-111-120. Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

38. Михалевський Д.В. Розробка моделі оцінювання основних параметрів безпроводного каналу стандарту 802.11 з урахуванням дестабілізуючих факторів. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. № 1. С. 59–67 Doi: 10.33243/2518-

7139-2020-1-1-59-67. Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

39. Михалевський Д.В. Оцінка адекватності моделей регресії в оцінюванні основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки.* 2020. Том 31 (70). №6. Частина 1. С. 16–20. DOI: 10.32838/TNU-2663-5941/2020.6/03 (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

40. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Розробка моделі оцінювання впливу архітектурних перешкод на основні параметри безпроводного каналу стандарту 802.11. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки.* 2020. Том 31 (70). №3. Частина 1. С. 48–53. (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

21. Михалевський Д.В. Розробка моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації для каналів стандарту 802.11 на основі квадратичної функції. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки.* 2020. Том 31 (70) № 4, 2020. С. 25–29. (Наукове фахове видання кат Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

79. Михалевський Д.В. Оцінка параметрів безпроводного каналу передачі інформації стандарту 802.11 Wi-Fi. *Східно-Європейський журнал передових технологій,* 2014, № 6/9 (72). С. 22-25. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31666. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus).

80. Михалевський Д.В., Гузь М.Д., Красота Р.О. Дослідження впливу довжини пакетів верхніх рівнів на ефективну швидкість передачі для стандарту Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах,* 2014, №4. С. 189-192.

81. Михалевський Д.В., Гузь М.Д. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту Wi-Fi.

Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2015, №1. С. 195-199. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

82. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка якості мультимедійного трафіку під час перемикання між точками доступу у мережах Wi-Fi. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2014, №3. С. 151-155. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

83. Михалевський Д.В., Мондляр В.Є., Красота Р.О. The research of wi-fi channel for multimedia traffic. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2014, №2. С. 175-178. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

84. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Система передачі високоякісних звукових сигналів без втрат. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2013, №3. С. 153-156. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

85. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка параметрів відео зображення в телекомунікаційних системах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2013, №1. С. 201-205. (Наукове фахове видання кат. Б, індексується Index Copernicus, Google scholar).

Статті у журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз даних:

86. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при перемиканні між точками доступу. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 3(36), Т. 6, 2014. С.56–59. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

87. Михалевський Д.В., Гузь М.Д., Красота Р.О. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 4(37),

Т. 5, 2014. С.13–16. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

88. Михалевський Д.В., Гузь М.Д. Оцінка розподілу потужності сигналу передавача стандарту 802.11 у приміщенні. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 1(38), Т. 3, 2015. С.48–52. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

89. Михалевський Д.В., Номировська В.В., Постернак О.М. Оцінка розподілу потужності сигналу для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 2(39), Т. 4, 2015. С.32–35. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

90. Михалевський Д.В., Номировська В.В., Постернак О.М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного та сусіднього інтерференційного каналів для стандарту 802.11n. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №2, 2015. С. 155-159. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

91. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 3(40), Т. 3, 2015. С.43–47. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

92. Михалевський Д.В. Аналіз побудови пакетів та кадрів під час передачі інформації безпроводним каналом стандарту 802.11. *Научные труды SWorld*, Вып. 1(42), Т. 4, 2016. С. 76–82. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

93. Михалевський Д.В., Крутінь А.В., Рогозіна Л.А. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11n частотного діапазону 5 ГГц. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №2, 2016. С. 214–218. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

94. Михалевський Д.В., Городецька О.С. Особливості технології MIMO у стандарті 802.11. *Научные труды SWorld*, Вып. 3(44), Т. 1, 2016. С. 49–54.

DOI:10.21893/2410-6720-2016-44-1-106. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

95. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №3, 2016. С. 172–176. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

96. Михалевський Д.В., Арсенюк Д.І., Жмурко І.С. Керуючий операційний елемент у стандарті 802.11. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 46, Т. 1. 2017. С. 27–32. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-46.1.105. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

97. Михалевський Д.В. Дослідження розподілу потужності сигналу в умовах багатопробеневого поширення хвиль для стандарту 802.11. *Сборник научных трудов Sword*, Вып. 47, Т. 1. 2017. С. 30–34. DOI: 10.21893/2410-6720.2017-47.1.091. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

98. Михалевський Д.В. Дослідження впливу чутливості приймачів стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №3, 2017. С. 176–180. (Наукове видання індексується Index Copernicus, Google scholar).

Основні праці, у матеріалах міжнародних конференцій:

99. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. *Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing*. Conference Proceeding. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine, P. 369-372.

100. Михалевський Д.В. Оцінка критерію якості для безпроводного каналу стандарту 802.11. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2015)*. Тези доповідей. 25-27 листопада 2015 р., м. Дніпропетровськ. С. 110-111.

101. Михалевський Д.В. Просторовий розподіл сигналу у приміщенні при центральному розміщенні точки доступу стандарту 802.11. *Сучасні проблеми*

радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТ-2017). Матеріали VI міжнар. наук.-техн. Конференції. 28-30 червня 2017 р., Вінниця, ВНТУ. С. 40-41.

102. Михалевський Д.В. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11ac. *Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях*. Матеріали VI міжнар. наук.-техн. Конференції. 9-11 листопада 2017 р., Чернівці, ЧНУ ім Ю. Федьковича, 2017. С. 31.

103. Михалевський Д.В. Дослідження просторового розподілу сигналу у приміщенні для стандарту 802.11. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції. 8-13 червня 2017 р., Одеса–Хмельницький, ОНАЗ ім. О.С. Попова–ХНУ, 2017. С. 188–189.

104. Михалевський Д.В. Оцінка об'єму інформації для однонаправленого режиму передачі кадру у стандарті 802.11. Математика. *Інформаційні технології. Освіта*. Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції. 5-7 червня 2016 р., Луцьк-Світязь. 2016. С. 90-91.

105. Михалевський Д.В. Дослідження розподілу потужності сигналу в умовах багатопроменевого поширення хвиль для стандарту 802.11. *Modern methods, innovation, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference*. Radom, Republic of Poland. December 27-28, 2017. С.47–50 .

106. Михалевський Д.В. Модель оцінки ефективної швидкості передачі інформації із врахуванням параметрів моніторингу. *Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)"*. 14-16 листопада 2019 р., Вінниця, ВНТУ, 2019. С. 28–29.

107. Михалевський Д.В. Розподіл потужності сигналу у приміщенні для кутового розміщення точки доступу стандарту 802.11 в діапазоні 5 ГГц. *Матеріали XIV міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)"*, 15-17 жовтня 2018 р. Вінниця, ВНТУ, 2018. С.1.

108. Михалевський Д.В., Шаталюк В.О., Куць В.Й. Особливості технології мімо у стандарті 802.11ac. *Матеріали XVI міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-16-2016)*, 10-15 червня 2016 р, Одеса, 2016. С. 204.

109. Михалевський Д.В. Особливості моделювання безпроводного каналу стандарту Wi-Fi. *Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки. IV МНПК. 23-25 жовтня 2014 р., Чернівці, 2014. С. 90.*

110. Михалевський Д.В. Гузь М.Д., Красота Р.О. Аналіз мультимедійного трафіку для концепції цифрового будинку. *Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ – 2014»*: 10-та ММНТК. 12-17 травня 2014 р., Севастополь, 2014. С. 96.

111. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Технологія МІМО для передачі звуку високої якості без втрат. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства. XX МНПК студентів,аспірантів,та молодих учених. Квітень 2013р., Кременчук, 2013.*

112. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Передача високоякісних звукових сигналів без втрат. *Матеріали XII міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-12-2013)*. Червень 2013р., Одеса, 2013.

113. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка параметрів передачі високоякісних звукових сигналів. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2013*. Жовтень 2013р., Вінниця ВНТУ, 2013. Ст. 40.

114. Михалевський Д.В., Красота Р.О., Гузь М.Д. Особливості передачі мультимедійного трафіку в безпроводних мережах. *Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»*. 10 – 16 березня 2014 р., Київ, 2014. С. 169-170.

115. Михалевський Д.В., Бойко М.В. Використання технології мімо для мережі цифрового будинку. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства. XXI*

МНПК студентів,аспірантів,та молодих учених. Квітень 2014р., Кременчук, 2014. С. 70-71.

116. Михалевський Д.В., Мондляр В.Є., Красота Р.О. Дослідження wi-fi каналу для передачі мультимедійного трафіку. *Матеріали XIII міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТІ-13-2014)*. Червень 2014р., Одеса, 2014. С. 214.

117. Михалевський Д.В. Аналіз параметрів сигналу у каналах стандарту 802.11g при спектральних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "MSATPA"* Oct. 20-22, 2014, Dubai. С. 33-37.

118. Михалевський Д.В. Дослідження потужності сигналу приймачів сигналу WI-FI. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "TPMSPS"*. Sep. 22-24, 2014, Dubai. С. 29-31.

119. Михалевський Д.В., Наугольних Є.С., Мельник В.М. Оцінка рівня сигналу від положення антен у просторі . *Матеріали XII Міжн. Конф. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)*. 14-16 жовтня 2014 р., ВНТУ, Вінниця.

120. Михалевський Д.В. Дослідження впливу довжини пакетів на параметри безпроводного каналу. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "The Goal of the World Science 2015"*, January 24-25, 2015, Dubai, UAE, 2015, P. 6-13.

121. Михалевський Д.В. Аналіз сигналу у каналах стандарту 802.11 при інтерференційних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Science and Education – Our Future"*, November 24-26, 2014, Abu Dhabi, UAE, P. 13-17.

122. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на пропускну здатність каналу 802.11. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Innovative technologies in science"*, February 21-22, 2015, Dubai, UAE). Vol. 1, P. 71-78.

123. Михалевський Д.В. Дослідження впливу інтерференційних каналних завад у мережах 802.11n. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Scientific and Practical Results in 2014"*, Desember 22-24, 2014, Dubai, UAE, Vol. 1, 2014, P. 33-36.
124. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на пропускну здатність каналу стандарту 802.11 ч.2. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conference "Metodology of modern reseach"*, March 21-22, 2015, Dubai, UAE, Vol. 1, 2015. P. 56-61.
125. Михалевський Д.В. Номировська В.В., Постернак О.М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного каналу для стандарту 802.11n. *Матеріали XIV міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-14-2015)», червень 2015 р, м. Одеса, с.253.*
126. Михалевський Д.В. Аналіз частотного спектру діапазону 5 ГГц для сімейства стандартів 802.11х. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «The Top Actual Researches in Modern Science, July 18-19, 2015, Ajman, UAE, Vol. I, P. 9-12.*
127. Михалевський Д.В. Дослідження чутливості приймачів стандарту 802.11. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions. September 24-25, 2015, Dubai, UAE, 2(2), Vol.1, P. 87-92.*
128. Михалевський Д.В. Поняття діагностики у мережах стандарту 802.11. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application. October 20-21, 2015, Dubai, UAE, 3(3), Vol.1, P. 20-21.*
129. Михалевський Д.В. Наугольних Є.С. Аналіз критеріїв ефективності безпроводних мереж. *Матеріали XIV міжнародної НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-15-2015)», вересень 2015р. Одеса. С. 80-81.*

130. Михалевський Д.В., Рогозіна Л.А., Крутінь А.В., Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для каналу стандарту 802.11n у діапазоні 5ГГц. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Innovative Technologies in Science.)* February 25 – 26, 2016, Dubai, UAE, 2(6), Vol.1, pp. 66-69.

131. Михалевський Д.В. Дослідження режиму multicast у стандарті 802.11. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Methodology of Modern Research).* March 28 – 29, 2016, Dubai, UAE, 4(8), Vol.1. P. 54-56.

132. Михалевський Д.В. Дослідження безпроводного каналу стандарту 802.11ac. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем (MEICS-2017):* Матеріали II Всеукраїнська. наук.-техн. конференції. 22-14 листопада 2017 р. Дніпро, ДНУ ім. О. Гончара, с. 70.

Патенти України на корисну модель:

133. Михалевський Д.В. Максимчук Ю.А. Пристрій для прийому сигналів ір телебачення, із подальшим їх відображенням: патент №75146 України на корисну модель. № u2012 048; заявка 18.04.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл. №22. 4 с.

134. Михалевський Д.В. Тіщенко І.Б. Янковчук Д.О. Пристрій для аналізу частотних каналів мереж стандарту wi-fi: патент № 102699 України на корисну модель. № u2015 05419; заявка, 02.06.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 4 с.

135. Михалевський Д.В. Тіщенко І.Б. Янковчук Д.О. Пристрій для оцінки параметрів якості відеозображення: патент № 102698 України на корисну модель. № u2015 05418; 02.06.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 4 с.