

ВІДГУК

офіційного опонента - доктора технічних наук, професора, професора по кафедрі радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича ПОЛІТАНСЬКОГО Руслана Леонідовича на дисертаційну роботу ЦИМБАЛЮКА Івана Ростиславовича

«МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПРИЙМАННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ»

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Актуальність теми дисертації

Достовірність приймання радіосигналів завжди була визначальною для якості зв'язку. У зв'язку із розвитком технологій, які призводять до таких основних тенденцій, як збільшення частоти використовуваного діапазону, збільшення кількості одночасно працюючих каналів, необхідність планування тривимірних схем каналів передавання, задача підтримки достовірності на належному рівні стає більш складною. Це обумовило пошук, дослідження і впровадження нових алгоритмів обробки сигналів, у тому числі й із використанням штучного інтелекту та машинного навчання. Ці технології, які успішно застосовувалися для задач розпізнавання недетермінованих сигналів у радіофізиці, астрономії та інших науках, були успішно перенесені у системи зв'язку, які здебільшого використовують детерміновані сигнали, але із значним фактором невизначеності, яка обумовлена як різного типу перешкодами, так і ентропійною невизначеністю джерел інформації, які приймають участь у обміні повідомленнями.

Нейронні мережі не є зовсім новою технологією, і їхня перевага виявилась у таких системах, як комп'ютерний зір, синтез та розпізнавання людської мови. Завдяки можливості навчання на великих масивах даних у подальшому такі системи стають повністю автономними і забезпечують високу достовірність одержаного результату. Але найбільшою перешкодою у подальшому впровадженні ставала потреба у значних обчислювальних ресурсах, що необхідні як для самого процесу навчання, так і для забезпечення функціонування навченої мережі. Вдосконалення моделей нейронних мереж дало можливість компілювати їх на персональних комп'ютерах і переносити на вбудовані системи, що мають відносно низький об'єм пам'яті та швидкодію процесорів. Завдяки цьому моделі із штучним інтелектом почали використовувати у абонентських пристроях мобільного зв'язку, підвищуючи

при цьому достовірність прийнятих радіосигналів, виявлення шуму і слабких сигналів у OFDM/PLC, і покращити показник QoS в цілому.

Таким чином розроблення методів та засобів підвищення достовірності приймання радіосигналів із використанням нейронних мереж з мінімізацією затребуваної обчислювальної потужності є актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертації відповідає науковим напрямкам кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету "Львівська політехніка" "Телекомунікаційні, інфокомунікаційні та радіотехнічні системи передавання даних, сигналів керування та телеметричної інформації" та "Проектування вбудованих процесорних систем з використанням штучного інтелекту і нейронних мереж". Дисертаційна робота виконана в межах держбюджетних науково-дослідницьких робіт:

1. «Підвищення ефективності засобів бездротового зв'язку відповідального призначення та процедур моделювання і прогнозування їх характеристик» (ДБ/Зв'язок) (2018-2019 рр.), держ. реєстр. № 0118U000261.
2. «Розроблення криптозахищеної системи високошвидкісного передавання даних у діапазонах УВЧ і НВЧ з підвищеними завадостійкістю та відмовостійкістю» (ДБ/ДЕМОДУЛЯЦІЯ) (2022-2023 рр.) держ. реєстр. № 0122U0009600.
3. «Методи та алгоритми роботи завадозахищеного радіоканалу зв'язку з використанням технології програмно-визначеного радіо» (ДБ/Радіозв'язок) держ. реєстр. № 0124U000777.
4. «Система криптозахищеного завадозахищеного прихованого зв'язку з безпілотними літальними апаратами великого радіусу дії з використанням ретранслятора» (2024-2026 рр.) держ. реєстр. № 0124U000825.

Достовірність отриманих у роботі наукових та практичних результатів забезпечується якістю та забезпеченням відповідних умов проведення експериментальних робіт, використанням відомих методів досліджень.

Наукова новизна отриманих автором результатів:

1. Вперше запропоновано та досліджено метод формування масиву радіосигналів для навчання нейронних мереж, який, на відміну від існуючих, базується на використанні комірок Вороного, що дало можливість спростити та впорядкувати процес навчання нейронних мереж для розпізнавання сигналів АМБС.
2. Вдосконалено метод імітаційного моделювання приймального та передавального пристроїв АМБС, який, на відміну від існуючих, дає

зможу обробляти радіосигнали в режимі реального часу, а також надає базис для імітації процесу оброблення радіосигналів із використанням моделей ШНМ.

3. Набула подальшого розвитку математична модель нейронної мережі оброблення радіосигналів, яка на відміну від інших, обробляє недетерміновані радіосигнали і базується на використанні операції згортки одновимірних даних, що забезпечує вищу достовірність оброблення радіосигналів за рахунок інваріантності щодо зсуву та виявлення абстрактних закономірностей зміни параметрів сигналів.

Практичне значення

1. Створено імітаційні моделі приймача та передавача АМБС з допомогою інструментів мови програмування Python та середовища GNU Radio.
2. Реалізовано програмно-апаратний приймач АМБС на базі системи з модифікованим для ПВР приймачем телевізійного стандарту DVB-T RTL-SDR v4 та мікрокомп'ютером PINE A64 для програмного оброблення прийнятих сигналів з допомогою середовища GNU Radio та одновимірної згорткової нейронної мережі, створеної інструментами бібліотеки TensorFlow.

Характеристика основних положень роботи

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку посилань і додатків.

У першому розділі приводиться стисла, але водночас детальна характеристика праць сучасних авторів, які присвячені обробці радіосигналів методами машинного навчання, штучного інтелекту та глибокого навчання. Найбільш цікавим є частина розділу, де розглянуті роботи, присвячені використанню штучного інтелекту для обробки сигналів у системах зв'язку. Зокрема, розглянуто роботи, у яких нейронні мережі LSTM використовують для виявлення слабких сигналів при низькому ВСШ, приводяться дослідження, у яких ШНМ типу RBF, supervised Kohonen, CPNN та X-Y fused використовують для виявлення шуму в OFDM/PLC, вказуються праці, у яких мережу AutoEncoder використовують для виявлення частотно-часових перекритих завадових сигналів. За результатом огляду наукових публікацій зроблено висновок про актуальність теми оброблення радіосигналів із використанням ШНМ.

В другому розділі приведені математичні моделі передавача і приймача, які використовують для передавання інформації сигнали АМБС, у яких модуляції підлягають як фаза сигналу, так і його амплітуда. На основі цих моделей складена логічна схема формування сигналів та утворення інформаційної послідовності на боці приймача, які використовують для цього комбінаційні схеми шифратора-дешифратора. Для тестування працездатності системи та дослідження її властивостей на основі математичної моделі впроваджена

імітаційна модель, яка реалізована у середовищі GNU RADIO. Приведені приклади передавання байтових послідовностей, згенерованих випадковим чином, підтверджують функціональну завершеність моделі та можливість її функціонування в умовах дії адитивного білого гаусового шуму та фазових спотворень у каналі. Проведені дослідження є основою для подальшого розвитку і оптимізації системи.

У третьому розділі автор приводить детальне роз'яснення того, яким чином відбувається розпізнавання аналогових сигналів засобами ШНМ на прикладі бінарної модуляції, приводячи при цьому значення отриманої точності 99,87 %. Далі детально описаний процес формування навчальної вибірки для сигналів генерованих із фазо-амплітудною модуляцією. Розглянуто метод формування масиву на основі комірок Вороного, що дало можливість спростити та впорядкувати процес навчання нейронних мереж для розпізнавання сигналів АМБС в порівнянні з іншими методами, для порівняння приведені співставлення прямокутної і прямокутної комірок. На основі описаної технології приводиться побудова ШНМ, яка містить згорткові та рекурентні шари. Це забезпечує можливість виділення локальних особливостей (згорткові мережі) та абстрактні властивості недетермінованих сигналів, але надмірне впровадження згорткових шарів може призвести до перенавчання мережі. Приведена матриця кореляції розробленої моделі, на основі якої можна зробити висновок про значне покращення порівняно із використанням інших моделей. Приведені оцінки швидкодії моделі, на основі яких зроблено висновок, що частота визначення символу становить 101,93 кГц.

У четвертому розділі приведені експериментальні дослідження нейромережевого підходу до приймання радіосигналів. Для цього використаний приймач на основі RTL-SDR з дипольною антеною з підключенням до комп'ютера Pine A64. Проведений експеримент показав значне покращення в точності ідентифікації сигналів порівняно з традиційними методами, а саме зменшення імовірності помилки в 1,45 разів при ВСШ -12 дБ.

Основний зміст роботи викладено на 115 сторінках. Робота містить 69 рисунків, 11 таблиць і 88 бібліографічних найменувань. Її загальний обсяг становить 147 сторінок.

Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

За результатами аналізу дисертаційної роботи та на основі довідки про її перевірку на академічний плагіат порушення академічної доброчесності не виявлено. Фальсифікація тексту відсутня.

Дискусійні положення, побажання щодо вдосконалення змісту, питання та зауваження до дисертації

Є дискусійні положення:

1) у другому розділі роботи мова йде про подолання проблеми перепаду фаз та амплітуд між символами методом додаткового розгляду перехідних процесів, але із тексту роботи незрозуміло, чи такий підхід є ефективним;

2) загальні результати говорять про значне покращення роботи моделі, але імовірність помилкового приймання залишається досить високою, крім того вона залежить того, який це сигнал, а характеристики системи визначаються найменш сприятливими випадками передавання; тому слід більшу увагу приділити можливості вирівняти характеристики, не зменшуючи при цьому загальну характеристику системи, яка визначається саме найбільшою імовірністю помилки канального символу.

Є зауваження до неточності формулювань, які заважають зрозуміти зміст сказаного:

1) на ст. 42 у формулі (1.13) приведений поліном n-го ступеня не містить усі необхідні члени;

2) на ст. 44 у формулі (1.16) індекси;

3) на ст. 32 замість «синфазний» вжитий слово «інфазний»;

5) на ст. 68 є незакінчене речення;

Є також зауваження, які стосуються оформлення роботи. А саме, орфографічні помилки:

1) на ст. 2 помилка у слові «обчислювальної»;

2) на ст. 2 за змістом речення, що починається як «**В дисертаційній роботі виконано науково-практичне завдання...**», доцільно було би вжити сполучник «та» замість «з», оскільки це виходячи із змісту роботи це є результат досягнення її автора, а не властивість самих нейронних мереж, які не завжди забезпечують мінімізацію обчислювальної потужності;

3) на ст. 4 замість словосполучення «неідеальності системи» слід було би вжити інший мовний оборот, який передає зміст речення;

4) на ст. 4 замість «при тому» слід вжити «при цьому», виходячи із змісту речення;

5) на ст. 5 замість «Результати тестування вказали» слід вжити «За результатами тестування зроблені наступні висновки:»

6) на ст. 28 одне із слів, які передають однаковий зміст зайве: «4G пропонує має коротшу затримку ...»;

7) на ст. 48 слово «покращення» написано з помилкою;

8) на ст. 56 слова «реалізована» написано з помилкою;

Загальний висновок

1. Дисертація Цимбалюка Івана Ростиславовича «Методи та засоби підвищення достовірності приймання радіосигналів із використанням нейронних мереж», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації» та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» є актуальною, завершеною науковою працею, що направлена на розв'язання актуального науково-практичного завдання розроблення нових методів та засобів приймання радіосигналів із використанням нейронних мереж. Рішення, що запропоновані Цимбалюком І. Р., є актуальними.

2. Дисертаційна робота за змістом та оформленням відповідає встановленим вимогам. Результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані у фахових наукових виданнях та апробовані на конференціях.

3. Беручи до уваги актуальність, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44), а її автор Цимбалюк І. Р. заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка», галузі знань «Електроніка та телекомунікації»,

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри радіотехніки та
інформаційної безпеки Чернівецького
національного університету імені Юрія
Федьковича

Руслан ПОЛТАНСЬКИЙ

