КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.415.056.5
DOI 10.17721/ISTS.2023.1.43-50

Володимир Наконечний, orcid.org/0000-0002-0247-5400,
nvc2006@i.ua
Володимир Сайко, orcid.org/0000-0002-3059-6787,
vgsaiko@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
Теодор Наритник, orcid.org/0000-0002-4118-0226,
director@mitris.com
Інститут електроніки та зв'язку Академії наук України, Київ, Україна

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМ ПОТЕНЦІАЛОМ ЗАХИЩЕНИХ РАДІОЛІНІЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Зростання великих обсягів інформаційних потоків спонукає до розроблення передавально-приймальних систем у діапазоні вкрай високих частот, для забезпечення ефективного керування радіолініями IR-UWB-сигналів терагерцового діапазону на базі алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж з урахуванням енергозбереження. Для цього у статті запропоновано алгоритм стеження за багатопроменевим сигналом системи прийому сигналів від просторово рознесених малопотужних передавачів, особливістю яких є уточнення у процесі стеження часових позицій компонентів та їхньої кількості. Особливістю розробленого алгоритму є застосування вейвлет-оброблення для отримання вхідного образу нейромережі. Запропоновано структурно-функціональну модель побудови приймальної системи IR-UWB-сигналів у діапазоні вкрай високих частот з елементами інтелектуального керування, яка базується на відокремленні площин керування та фізичної інфраструктури для автоматичного й оперативного керування процесом спільного використання ресурсів фізичної інфраструктури і методів штучного інтелекту. На відміну від існуючих моделей приймальних систем IR-UWB-сигналів терагерцових діапазонів, вона забезпечує протокольно й інфраструктурно збір даних для інтелектуальних алгоритмів. Представлена фізична інфраструктура має модуль навчання й оптимізації, який передбачає використання наявної імітаційної моделі радіолінії терагерцового діапазону від 0,11 до 0,17 терагерц для тестування інтелектуальних алгоритмів керування енергетичним потенціалом радіоліній IR-UWB-сигналів. Розроблений алгоритм збору даних передбачає відслідковувати стан блоків приймального комплексу для раціонального збору даних із використанням зміни значень як метрик евклідових відстаней, так і метрик функціональних технічних параметрів, відносно кількості кластерів.

Ключові слова: *захист інформації; система безпеки; теорія ігор; оптимальна стратегія; система порушника; прийняття рішення.*

1. ВСТУП

Розвиток мереж п'ятого покоління (5G) і подальше збільшення щільності малих стільників і точок доступу веде до необхідності приділення суттєвої уваги каналу радіозв'язку між точкою доступу і мережею інтернет. Досить часто використання дротового з'єднання для організації подібного каналу зв'язку недоцільне з багатьох економічних причин.

У цих умовах бездротове з'єднання, що працює в терагерцовому (ТГц) діапазоні частот є приваб-

© Наконечний В., Сайко В., Наритник Т., 2023

ливим ресурсом для побудови високошвидкісних бездротових мереж зв'язку. Причому національними регуляторами багатьох країн визначено терагерцові діапазони частот і встановлено обмеження на спектральну потужність випромінювання надширокосмугових (НШС) сигналів для їхнього неліцензованого використання.

У силу обмежень на спектральну щільність дальність випромінювання НШС-пристроїв зв'язку становить 10–50 м, тому основні області застосування НШС зв'язку – це бездротові мережі та бездротові сенсорні мережі зв'язку малого радіуса дії (локальні й персональні мережі).

Для розширення сфери застосування технології НШС терагерцового діапазону, необхідно збільшити дальність дії приймально-передавальних пристроїв у режимі "точка–точка".

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Неухильне зростання різноманітності й обсягів інформаційних потоків у телекомунікаційних радіомережах спонукають до розв'язання науково-практичного завдання – розроблення інфраструктури передавально-приймальних систем у діапазоні вкрай високих частот для забезпечення ефективного керування радіолініями IR-UWB-сигналів ТГц-діапазону на базі алгоритмів машинного навчання і нейронних мереж з урахуванням параметра енергозбереження.

Для розв'язування поставленої задачі представляє інтерес комбіноване застосування:

- методів прийому багатопроменевого сигналу;
- принципів побудови алгоритмів формування й оброблення сигналів у багатопозиційних системах зв'язку;
- методів штучного інтелекту та машинного навчання.

Розроблення інноваційних методів підвищення ефективності керування використанням енергетичного потенціалу радіоліній терагерцового діапазону для підвищення завадостійкості й дальності дії низькоорбітальної системи зв'язку є новим науковим напрямом [1, 2].

Сучасні підходи до розв'язання подібних науково-технічних задач не дозволяють отримати очікувані результати. З урахуванням висвітленої проблеми метою цієї статті є розроблення методу підвищення ефективності керування та використання енергетичного потенціалу радіоліній на основі просторово рознесених пристроїв [3], в яких застосовують терагерцовий діапазон частот із метою забезпечення підвищення завадостійкості та дальності дії каналів зв'язку систем зв'язку на основі висотних аероплатформ.

Відомий спосіб прийому багатопроменевого сигналу [4], який полягає в тому, що у ході прийому періодично визначають числові й часові затримки компонентів багатопроменевого сигналу, для чого визначають часову область багатопроменевості, проводять пошук сигналу в області багатопроменевості і визначають оцінку пошуку числа і часових затримок компонентів багатопроменевого сигналу. Після цього формують оновлені числа і часові затримки компонентів багатопроменевого сигналу, знаходять часові затримки компонентів багатопроменевого сигналу поточного періоду, постійно уточнюючи оновлені часові затримки компонентів багатопроменевого сигналу. У результаті цього, з використанням указаних часових затримок, формують відповідні рішення про інформаційні символи.

Проте недоліком такого способу є те, що вибір порога h, який використовується для виявлення кластерів променів, ґрунтується на первинній оцінці імпульсної характеристики каналу. Оцінки отримують з аналізу прийнятого тестового сигналу і тому, практично у всіх способах з'являється серйозна інженерна проблема вибору порога прийняття рішення, яка або не вказується, або їй приділяється недостатньо уваги.

У [4] як поріг h обирається поріг, пропорційний потужності шуму. Таким чином, ці способи є малоефективними, тому що знижують інформаційну швидкість, і до того ж частково не доведені до конструктивних інженерних алгоритмів. Тому потрібно знайти ефективніше розв'язання цього завдання.

Крім того, реалізація вказаного способу не враховує факт спотворення часової форми імпульсів приймальної системи IR-UWB-сигналів ТГц-діапазонів [5, 6]. Хоча результати дослідження з передачі UWB-сигналу пікосекундної тривалості через ідеалізовану модель радіоканалу терагерцового каналу 0,11–0,14 ТГц показують, що основним видом спотворення часової форми імпульсу є його розширення від початкової тривалості 140 пс до 250 пс, яка обумовлена в першу чергу обмеженням смуги пропускання у фільтрах нижньої частоти та смуг пропускних фільтрів передавального та приймального трактів [7].

Зауважимо, що розширення імпульсів призводить до зменшеня їхньої амплітуди, а це знижує ефективність селекції імпульсів на тлі шумів і завад. Це обумовлено тим, що у разі неперіодичної послідовності імпульсів середня шпаруватість $\bar{Q}$, як відношення тривалості сигналу T_c до сумарного часу тривалості імпульсів у сигналі, буде така:

$$\bar{Q} = \frac{T_c}{\tau n} = \frac{1}{V \tau n}, \quad (1)$$

де V – швидкість передачі; n – кількість імпульсів у сигналі; τ – тривалість імпульсу.

І відповідно середня шпаруватість сигналу повинна бути якомога більше 1. В іншому випадку кожен із сигналів буде представляти собою щільний потік імпульсів, що унеможливить кодове розділення сигналів у мережі, де одночасно працює безліч терміналів.

Середня шпаруватість сигналів, по суті, визначає можливість забезпечення їхньої ортогональності, тобто можливість поділу сигналів.

Зауважимо також, що значення середньої шпаруватості Q^{-} визначає середню потужність сигналу P^{-}, що передається, якщо відома пікова потужність імпульсів P_i за такою формулою:

$$\bar{P} = {P_i}/{\bar{Q}}\,. \qquad (2)$$

Тому єдиним шляхом підвищення потужності сигналу при обмеженнях на тривалість і кількість імпульсів є підвищення амплітуди (пікової потужності) переданих імпульсів.

Автори в роботі [4] не запропонували механізм моніторингу й керування тривалістю UWB-сигналу та відповідно модель ефективного керування використанням енергетичного потенціалу радіоліній.

3. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

3.1. Загальна архітектура інноваційного рішення

Авторами пропонується (рис. 1) використання інтелектуальних алгоритмів на базі тренованих моделей штучного інтелекту, які використовуватимуться на фізичному рівні запропонованої архітектури приймальної системи IR-UWB-сигналів ТГц-діапазонів із використанням алгоритмів на базі штучного інтелекту, а також на рівні площини керування комплексом.

Роботу цих алгоритмів зосереджено на керуванні використанням енергетики радіоліній з IR-UWB-сигналів і, як результат, оптимізації використання ресурсів їхнього енергетичного потенціалу.

Наприклад, використання алгоритмів на базі нейронних мереж для реалізації вейвлет-перетворення дозволяє уникнути великої кількості обчислень і набагато прискорити пошук коефіцієнтів вейвлет-розкладання для ефективнішого використання спектральних ресурсів каналу зв'язку.

Інтелектуальні алгоритми керування на SDN-контролері можуть здійснювати оптимізацію на рівні цілого комплексу. Проте для таких алгоритмів, які працюють на рівнях фізичному й керування, повинні мати відповідну інфраструктуру для збору даних, тренування, тестування й оновлення відповідних тренованих моделей.

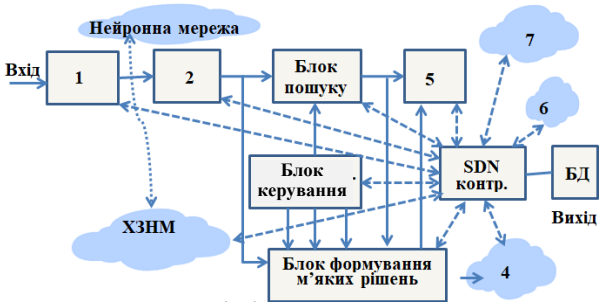

Рис. 1. Структурна схема запропонованої архітектури приймальної системи ТГц-діапазону з використанням алгоритмів на базі штучного інтелекту:

1. Блок ВО – вейвлет-оброблення;
2. Блок АФ – блок адаптивної фільтрації;
3. ХЗНМ – хмара зберігання нейронних мереж;
4. ХЗСП FE – хмара зберігання статистичних параметрів FE;
5. БОКБС – блок оновлення компонент багатопроменевого сигналу;
6. ML алгоритми Н та Т – ML навчання та тренування;
7. ML алгоритми М та О – ML моніторингу й оптимізації

На рис. 2 показано інфраструктуру нейронної мережі розробленого інноваційного рішення. Її складовими є такі модулі: 1 – роботи алгоритмів ML на SDN-контролері; 2 – тренування нейронної мережі; 3 – навчання й оптимізації нейронної мережі; 4 – канали зв'язку для оновлення нейронної мережі та відповідного програмного забезпечення; 5 – модуль роботи алгоритмів із використанням нейронної мережі на блоках інноваційного рішення.

Підтримка такої інфраструктури повинна вартувати менше, ніж переваги, які вона має надати. У багатьох роботах представлено використання поодиноких алгоритмів на базі нейронних мереж, які здійснюють оптимізацію конкретного процесу чи частини пристрою [8].

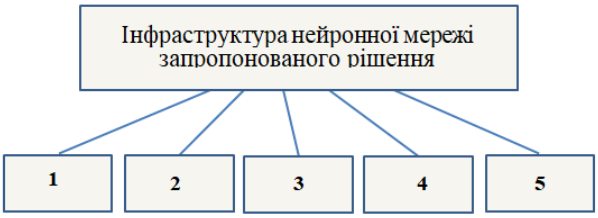

Рис. 2. Інфраструктура нейронної мережі розробленого інноваційного рішення

Проте в них не показано, яким чином відбувається збір даних, тренування нейронних мереж, а також оновлення відповідного програмного забезпечення. Тобто не представлено, яким чином повинна працювати повна інфраструктура із зворотним зв'язком для алгоритмів, які здійснюють

оптимізацію роботи приймального комплексу IR-UWB-сигналів ТГц-діапазону з використанням нейронних мереж.

3.2. Модель попереднього оброблення сигналу із застосуванням вейвлет-оброблення

Існуючі методи [8], які використовують фільтрацію сигналів за допомогою вейвлет-перетворення в нейромережних системах класифікації образів, не можуть бути безпосередньо застосовані до моделей та алгоритмів ефективного керування використанням енергетичного потенціалу радіоліній. Тому важливим напрямом подальших досліджень є адаптація відомих нині методів штучного інтелекту до особливостей моніторингу й оптимізації функціонування багатопозиційних систем на основі малопотужних приймально-передавальних пристроїв для побудови міжсупутникових каналів зв'язку терагерцового діапазону низькоорбітальних супутникових систем з архітектурою розподіленого супутника.

У складі блоку пошук (див. рис. 1) є пристрій, який визначає значення вирішальної функції для заданих дискретних часових затримок області багатопроменевості, порівнює значення сформованої вирішальної функції із заданим порогом *h* і формує оцінки пошуку часових затримок компонентів багатопроменевого сигналу з перевищення порога *h*.

Як відомо, у ході прийому широкосмугових багатопроменевих сигналів виконується також процедура пошуку, яка, як правило, являє собою сканування області невизначеності з виявленням сигналу в кожній її точці.

Недоліком відомих підходів оброблення багатопроменевих сигналів на основі застосування процедури пошуку є те, що під час проведення цієї процедури пошуку сигналів променів не враховується вплив компонентів багатопроменевого сигналу один на одного. Унаслідок цього зростає ймовірність помилкового виявлення сигналів променів. Крім того, не здійснюється оптимізація числових сигналів променів, які використовують для отримання м'яких рішень про інформаційні символи, що призводить до завищених вимог до апаратурної реалізації без збільшення якості виділеної інформації.

Із цього погляду, доцільним є введення процедури відстеження й ідентифікація зміни властивостей нестаціонарних процесів в алгоритмі пошуку сигналів, а також адаптація до зміни рівня шуму.

Блок-схема роботи системи попереднього оброблення сигналу із застосуванням вейвлет-оброблення для отримання вхідного образу нейромережі запропонованого підходу зображена на рис. 3.

Особливістю запропонованого підходу є те, що з метою адаптації цифрового оброблення сигналу до змінного в часі шуму, при розв'язанні задачі розпізнавання наявності або відсутності сигналу на заданому інтервалі, запропоновано спосіб на основі вейвлет-перетворення і нейронної мережі.

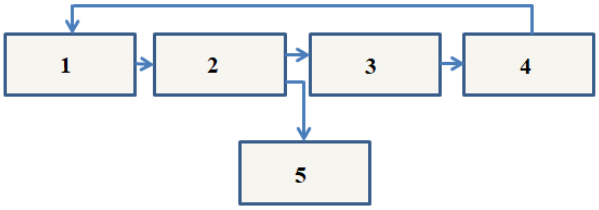

Рис. 3. Блок-схема роботи запропонованої системи попереднього оброблення багатопроменевого сигналу:

1. Багатопроменевий сигнал;
2. Блок вейвлет-перетворення;
3. Нейронна мережа;
4. Результат попереднього оброблення сигналу;
5. Надлишкова інформація

Вейвлет-перетворення дозволяє більш точно локалізувати частотні властивості сигналу в часі та не призводить до збільшення обсягу даних у процесі переходу від часового подання сигналу до його подання у вейвлет-області. Причому найкраще частотне розділення забезпечує фільтр із найбільшою крутизною амплітуди частотних хвиль (АЧХ). Така риса властива вейвлетам Добеши.

Зі збільшенням порядку фільтра Добеши його АЧХ прагне до ідеальної. Але необхідно враховувати те, що застосування фільтра з довгою імпульсною характеристикою призводить до вельми помітного спотворення. З урахуванням цього найдоцільнішим є використання фільтра Добеші 4, кофлета 2 і сіммлета. Біортогональні вейвлети Добеши дозволяють також зменшити обсяг обчислень під час розкладання за рахунок використання коротких фільтрів [9, 10].

Запропонований алгоритм поділу інтервалів наявності або відсутності сигналу побудовано з урахуванням особливостей розповсюдження багатопроменевого сигналу, які описуються персептуальною моделлю. Модель розділяє спектр багатопроменевого сигналу на частотні смуги, на так звані критичні інтервали.

У розробленому алгоритмі використано вейвлет – перетворення багатопроменевого сигналу по біортогональному базису Добеши, а для прийняття рішення про типи інтервалу (сегмента) сигналу – нейронну мережу на багатошаровому персептроні.

Порівняно з традиційними спектральними методами вейвлет-перетворення дає більш точну локалізацію сигналу за часом і за частотою (у субсмугах розкладання), має швидкий алгоритм

реалізації. Біортогональний базис зберігає фазові співвідношення частотних компонентів сигналу після його відновлення зворотним вейвлет-перетворенням. Подальше поліпшення запропонованого способу досягнуто зменшенням розмірності вхідного вектора персептрона, яке дозволило зменшити число навчальної вибірки і прискорити процес навчання. Зниження розмірності вхідних векторів у ході навчання нейронної мережі засновано на алгоритмі головних компонентів.

Результати дослідження залежності ймовірності помилки розпізнавання від розмірності вектора ознак після виконання перетворення методом головних компонентів показано на рис. 4.

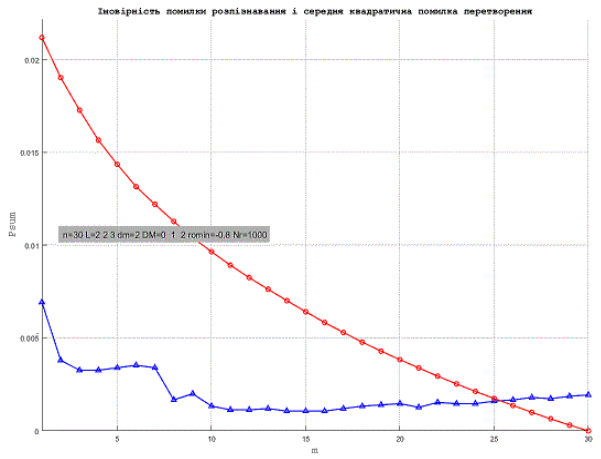

Рис. 4. Залежності для сумарної імовірності помилки і СКП перетворення від розмірності вектора ознак після виконання перетворення алгоритмом головних компонентів

Представлені результати показують, що залежності для сумарної імовірності помилки розпізнавання (крива зверху) і середньоквадратичної помилки (СКП) перетворення мають практично монотонно спадний характер, причому виділення головних компонентів і зниження на цій основі розмірності простору ознак дає суттєвіший ефект у разі збільшення ступеня кореляції вихідних ознак.

Для навчання багатошарового персептрона використано алгоритм Левенберга – Марквардта (Levenberg – Marquardt Algorithm, LMA), який є найпоширенішим алгоритмом для мінімізації квадратичних відхилень. Його перевагами, порівняно з методом градієнтного спуску, є велика швидкість обчислення.

3.3. Система моніторингу й оптимізації роботи запропонованого рішення

У розробленій архітектурі запропоновано застосовувати модуль навчання та тестування, який дозволяє підлагоджувати інтелектуальні алгоритми керування, а саме процеси підготовки, тестування й оцінювання перед їхнім розгортанням у інноваційному рішенні.

Для навчання або тестування таких алгоритмів можна використовувати змодельовані дані або дані з реальної приймальної системи IR-UWB сигналів ТГц-діапазонів. Указаний підхід дозволяє якісніше підготуватись до запуску таких алгоритмів на реальних мережах і зменшити відповідні ризики (див. рис. 1).

4. РЕЗУЛЬТАТИ

Для оцінювання таких алгоритмів слід увести певні функціональні метрики розробленої системи, на базі яких будуть здійснювати оцінку даних алгоритмів. Модуль навчання та тестування включає імітаційну модель бездротової телекомунікаційної системи терагерцового діапазону на основі використання IR-UWB багатопроменевих сигналів пікосекундної тривалості з відповідними складовими для максимального наближення до роботи реального розробленого приймального пристрою.

Як середовище імітаційного моделювання обрано програмний NI Multisim 13.0 [11]. Це пов'язано з тим, що у САПР Microwave Office відсутня можливість підключення до приймального тракту ТГц-діапазону активної моделі приймача IR-UWB-сигналів, що зібрана з окремих елементів.

Особливістю моделювання приймача IR-UWB-сигналів є те, що у першу чергу необхідно зібрати імітаційну модель, що відповідає передавальній частині, в якій саме й відбувається формування IR-UWB-сигналу.

Ідеалізовану імітаційну модель радіолінії ТГц-діапазону будуватимемо на базі параметрів і структурної схеми діючого макета приймача-передавача ТГц-діапазону [7].

Метрики розробленої системи оцінювання роботи нейронної мережі повинні мати звичні функціональні параметри цього рішення: співвідношення сигнал/шум, тривалість імпульсу UWB-сигналу, ефективність використання спектральних ресурсів каналів зв'язку тощо.

Якщо перетренована модель для певного алгоритму призвела до погіршення функціональних параметрів, то дана модель повинна бути повернена або має бути видалена з модуля зберігання даних.

Щоб інтелектуальні алгоритми керування видавали правильний результат, необхідно зібрати достатній набір даних, під яким розуміють оптимальну кількість даних, при якій тренування моделей вважається завершеним і не спосте-

рігається так званий процес оверфітингу. Для збору функціональних даних використовують SDN-контролер, який безпосередньо здійснює процес збору відповідних даних із блоків приймальної системи IR-UWB-сигналів ТГц-діапазону. Кожен блок приймальної системи є як джерелом інформації для ML-алгоритмів, так може бути і метою їхнього застосування. Основне оброблення даних перед тренуванням нейронних мереж здійснюється на SDN-контролері. Усі зібрані функціональні параметри, які необхідні для тренування нейронних мереж, зберігаються у хмарі FE. Доступ до цих параметрів мають лише інтелектуальні алгоритми на SDN-контролері.

Якщо відбулася зміна стану приймальної системи IR-UWB-сигналів у діапазоні на вкрай високих частотах, яка вимагає перетренування відповідних моделей, то відповідні алгоритми здійснюють необхідну процедуру перетренування їх на базі нових параметрів FE. Після цього відбувається заміна відповідних натренованих моделей у хмарі. Коли з'явилась нова версія моделі для відповідного блоку, блок завантажує відповідну оновлену версію моделі.

У роботі використано кластерний підхід визначення станів приймальної системи IR-UWB-сигналів у діапазоні вкрай високих частот із навчанням без нагляду з використанням ML-алгоритмів *k*-means (*k* – середніх) та *c*-means (*c* – середніх) для розробленого алгоритму збору даних [12, 13]. Цей підхід дозволяє визначити на базі певного проміжку часу необхідні стани запропонованого пристрою або появу нових станів. Крім того, такий підхід дозволяє враховувати більшу кількість функціональних технічних параметрів із мінімальною зміною програмного забезпечення. Важливою складовою інтелектуальних алгоритмів керування є збір безпосередньо даних для навчання.

Однією з особливостей використання даних алгоритмів у телекомунікаційних радіомережах ТГц-діапазону є змінність станів у комплексі, а також поява нових і зникнення поточних станів, що вимагає додаткового збору даних і перетренування нейронних мереж.

У роботах [8, 9] представлено використання алгоритмів на базі нейронних мереж для реалізації вейвлет-перетворення у приймальних системах. Але в цих роботах не показано, яким чином здійснюється збір певних функціональних технічних даних. Тому розроблення алгоритму раціонального збору даних для нейронних мереж із відповідних блоків приймальної системи є досі актуальним.

Розроблений алгоритм збору даних передбачає відстежування стану блоків приймального комплексу для раціонального збору даних фактично з використанням зміни значень як метрик евклідових відстаней, так і метрик функціональних технічних параметрів, відносно кількості кластерів. Новизна цього підходу полягає у відмінності від класичної реалізації у тому, що введено метрики співвідношення сигнал/шум і тривалість імпульсу UWB-сигналу, замість метрики евклідової відстані, що дає змогу враховувати просторові характеристики поширення сигналу у процесі самооптимізації розробленої приймальної структури та відповідно підвищити її технічну ефективність.

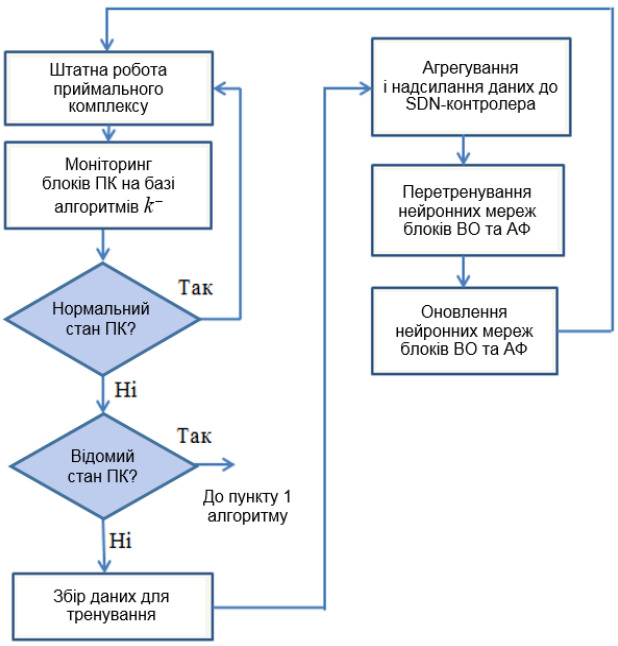

Рис. 5. Блок-схема алгоритму відстежування стану приймального комплексу для збору і перетренування відповідних нейронних мереж

5. ВИСНОВКИ

1. Розроблено алгоритм стеження за багатопроменевим сигналом системи прийому сигналів від просторово рознесених малопотужних передавачів, особливістю якого є уточнення у процесі стеження не тільки часових позицій компонентів, але також і їхнього числа. Відмінною особливістю розробленого алгоритму є те, що він побудований із застосуванням вейвлет-оброблення для отримання вхідного образу нейромережі.

2. Запропоновано структурно-функціональну модель побудови приймальної системи IR-UWB-сигналів ТГц-діапазонів з елементами інтелектуального керування приймальним комплексом на фізичному рівні та керування комплексом. На відміну від існуючих інфраструктур приймальної

системи IR-UWB-сигналів ТГц-діапазонів, ці радіомережі не здатні забезпечити протокольно й інфраструктурно збір необхідних даних для інтелектуальних алгоритмів. Запропонована інфраструктура має модуль навчання й оптимізації, який передбачає використання існуючої імітаційної моделі радіолінії ТГц-діапазону від 0,11 до 0,17 ТГц для тестування інтелектуальних алгоритмів керування енергетичним потенціалом радіоліній IR-UWB-сигналів ТГц-діапазону.

3. Подальше наукове дослідження направлено на проведення моделювання й дослідження ефективності запропонованих рішень на основі розробленої імітаційної моделі керування енергетичним потенціалом радіоліній IR-UWB-сигналів ТГц-діапазону, а також розроблення вебзастосунку, який відображатиме реальний стан розробленого приймального пристрою і дозволить змінювати необхідні функціональні параметри для одержання необхідних результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Saiko, V., Nakonechnyi, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., & Toliupa, S. (2020). Increasing Noise Immunity between LEO Satellite Radio Channels. In *Proceedings – 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, TCSET 2020, pp. 442–446.

[2] Saiko, V., Nakonechnyi, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., & Lukova-Chuiko, N. (2020). Terahertz Range Interconnecting Line for LEO-System. In *Proceedings – 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, TCSET 2020, pp. 425–429.

[3] Сайко В. Г. (2020, 22–24 бер.). Алгоритм обробки сигналів багатопозиційної системи, що використовує принцип просторово-розподіленого випромінювання. *The 3th International scientific and practical conference, Eurasian scientific congress*‖*, Barca Academy Publishing*, Barcelona, Spain, pp. 155–160.

[4] Narytnik, T., Saiko, V., Bilous, O., & Fisun, A. (2019). Energy calculation of the terahertz radio link Telecommunications and Radio Engineering. *English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika*, 78(6), 537–557.

[5] Avdeenko, G., Narytnik, T., Korsun, V., & Saiko, V. (2019). Simulation of a terahertz band wireless telecommunication system based on the use of IR-UWB signals. *In Telecommunications and Radio Engineering, English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika*, 78(10), 901–919.

[6] Наритник Т. М., Авдєєнко Г. Л., Сайко В. Г., & Корсун В. І. (2018). Дослідження передавання модульованих IR-UWB сигналів системою радіозв'язку терагерцового діапазону. *Цифрові технології*, 24, 17–32.

REFERENCES

[1] Saiko, V., Nakonechnyi, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., & Toliupa, S. (2020). Increasing Noise Immunity between LEO Satellite Radio Channels. *In Proceedings – 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, TCSET 2020, pp. 442–446.

[2] Saiko, V., Nakonechnyi, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., & Lukova-Chuiko, N. (2020). Terahertz Range Interconnecting Line for LEO-System. In Proceedings – 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020, pp. 425–429.

[3] Saiko V. G. (March 22–24, 2020). Algorithm for processing signals of a multi-position system using the principle of spatially distributed radiation. *The 3th International scientific and practical conference, Eurasian scientific congress*‖*, Barca Academy Publishing*, Barcelona, Spain., pp. 155–160 [in Ukrainian].

[4] Narytnik, T., Saiko, V., Bilous, O., & Fisun, A. (2019). Energy calculation of the terahertz radio link Telecommunications and Radio Engineering. *English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika*, 78(6), 537–557.

[5] Avdeenko, G., Narytnik, T., Korsun, V., & Saiko, V. (2019). Simulation of a terahertz band wireless telecommunication system based on the use of IR-UWB signals. *In Telecommunications and Radio Engineering, English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika*, 78(10), 901–919.

[6] Narytnyk, T. M., Avdeyenko, G. L., Saiko, V. G., & Korsun, V. I. (2018). Study of the transmission of modulated IR-UWB signals by a radio communication system of the terahertz range. *Digital technologies*, 24, 17–32 [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редколегії 27.02.2023

The method of increasing the efficiency of management of the energy potential of protected radio lines in the terahertz range using artificial intelligence

The growth of large volumes of information flows encourages the development of transmission and reception systems in the very high frequency range to ensure effective control of IR-UWB radio links of terahertz signals based on machine learning algorithms and neural networks, taking into account energy saving. For this purpose, the article proposes an algorithm for tracking a multipath signal of a system for receiving signals from spatially separated low-power transmitters, a feature of which is the refinement in the process of tracking the time positions of the components and their number. A feature of the developed algorithm is the use of the wavelet transform to obtain the input image of the neural network. A structural and functional model for constructing a receiving system for IR-UWB signals in the very high frequency range with intelligent control elements is proposed, which is based on separate control planes and physical infrastructure for automatic and operational control of the process of sharing physical infrastructure resources and artificial intelligence methods. Unlike existing models of IR-UWB receiving systems for terahertz signals, it provides protocol and infrastructure data collection for intelligent algorithms. The presented physical infrastructure has a training and optimization module that involves the use of an existing simulation model of a radio link in the terahertz range from 0.11 to 0.17 terahertz to test intelligent algorithms for controlling the energy potential of IR-UWB radio links. The developed data collection algorithm involves monitoring the state of the blocks of the receiving complex for rational data collection using the change in the values of both the Euclidean distance metrics and the metrics of functional technical parameters in relation to the number of clusters.

Keywords: *information protection; security system; game theory; optimal strategy; system of the violator; making a decision.*

Володимир Наконечний,
д-р техн. наук, проф.
Професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ, Україна.

Volodymyr Nakonecnii,
Dr. Sci. (Engin.), Prof.
Professor of the Department of Cyber Security and Information Protection of Taras Shevchenko Kyiv National University. Kyiv, Ukraine.

Володимир Сайко,
д-р техн. наук, проф.
Професор кафедри прикладних інфор - маційних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ, Україна.

Volodymyr Saiko,
Dr. Sci. (Engin.), Prof.
Professor of the Department of Applied Information Systems of Taras Shevchenko Kyiv National University. Kyiv, Ukraine

Теодор Наритник,
канд. техн. наук, проф.
Директор Інституту електроніки та зв'язку Української академії наук. Київ, Україна.

Teodor Narytnyk,
PhD (Engin.), Prof.
Director of the Institute of Electronics and Communication of the Ukrainian Academy of Sciences. Kyiv, Ukraine.