

DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2026.28.2.363162>

УДК 004.5

**В. О. Додонов¹, Е. І. Гасанов², Є. І. Изварін¹,
С. І. Отрох², І. В. Сегеда²**

¹Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

²Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Проспект Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна

Новий вид представлення сигналу, який піддається відновленню методами штучного інтелекту при втраті частини даних

Розроблено новий вид представлення радіосигналу, який адаптовано для відновлення методами штучного інтелекту в умовах часткової втрати даних. Обґрунтовано, що традиційні методи цифрової обробки сигналів не забезпечують достатньої живучості інформаційних систем при деструктивних завадах. Авторами запропоновано підхід, що базується на інтеграції нейромережесих моделей для реконструкції структури сигналу із використанням його внутрішніх закономірностей. Досліджено використання згорткових і нейросимвольних мереж для компенсації втрачених сегментів даних і усунення фазових дисбалансів. Описана методика дозволяє суттєво підвищити ситуаційну обізнаність і надійність функціонування складних технічних систем. Результати моделювання підтверджують вищу швидкість обробки та точність відтворення сигналів порівняно з класичними алгоритмами.

Ключові слова: штучний інтелект, живучість системи, нейронні мережі, цифрова обробка сигналів, відновлення даних, радіосигнал.

Вступ та мета роботи

У сучасних умовах цифрова обробка сигналів є фундаментальною задачею для функціонування критичних інфраструктур — від систем супутникового зв'язку до радарних комплексів і мобільних мереж нового покоління. I/Q-представлення (In-phase та Quadrature) — це основний вид представлення радіосигналів, які дозволяють маніпулювати його фазою і амплітудою. Запис сигналів у такому представленні є ключовим для аналізу, виявлення та ідентифікації джерел випромінювання.

© В. О. Додонов, Е. І. Гасанов, Є. І. Изварін, С. І. Отрох, І. В. Сегеда

Проте зі зростанням швидкості передачі, ширини каналу та складності ефірного середовища виникає гостра потреба у розробці методів, здатних не лише зберегти сигнал, але й реконструювати та відновлювати його структуру у разі критичних пошкоджень або втрати даних. Цілісність передачі I/Q-даних постійно перебуває під загрозою через низку дестабілізуючих факторів. Що робить задачу розробки нових форм представлення даних пріоритетним напрямом сучасної радіофізики та інженерії.

Основними причинами втрати частин даних є інтенсивні завади природного та техногенного характеру, які приводять до обмеження пропускнуої шини, ефекти багатопробеневого поширення, а також навмисні деструктивні впливи, такі як засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ). Крім того, у сучасних пакетних мережах передачі часто виникають ситуації «випадання» фрагментів через перевантаження каналів або апаратні збої. Такі розриви в потоці даних призводять до неповного отримання даних для аналізу та ідентифікації сигналу, що ставить під загрозу надійність всієї системи виявлення та ідентифікації джерела радіовипромінювання.

Для зменшення втрати інформаційних фрагментів інформаційні комп'ютерні системи (ІКС) повинні мати високий ступінь живучості. Під живучістю в даному контексті слід розуміти здатність системи зберегти свою працездатність і виконувати цільові функції навіть за умов часткового руйнування інформаційної структури сигналу. Стійка ІКС повинна володіти механізмами внутрішньої адаптації, які дозволяють автоматично компенсувати втрачені сегменти даних, запобігаючи каскадним відмовам у каналах управління та зв'язку. Такий підхід забезпечить безперервність інформаційних процесів у нестабільному середовищі.

Найбільш перспективним шляхом реалізації такої стійкості є інтеграція методів штучного інтелекту (ШІ) безпосередньо в алгоритми відновлення сигналу. На відміну від традиційних інтерполяційних методів, нейромережеві моделі здатні виявляти глибокі приховані закономірності у структурі сигналів і «добудовувати» втрачені фрагменти на основі контексту та попереднього досвіду навчання, саме покращення цього процесу можливе за допомогою використання іншого, більш придатного для обробки ШІ формату записів і передачі даних. Використання ШІ дозволяє створити інтелектуальний базис для відновлення даних, що перетворює звичайну систему обробки сигналів на самовідновлювану структуру, що здатна протистояти найбільш складним деструктивним впливам.

Метою роботи є розробка інваріантного представлення радіочастотних сигналів, адаптованого для відновлення даних методами штучного інтелекту в умовах часткової втрати інформації. Дослідження спрямоване на формування засад побудови відмовостійких інформаційних комп'ютерних систем, що здатні зберегти функціональну живучість під впливом деструктивних чинників.

Основну увагу приділено інтеграції нейромережевих моделей у процеси обробки сигналів для забезпечення цілісності даних у реальному часі без значного збільшення обчислювальної складності системи.

Результатом роботи стане представлення, яке забезпечить зменшення складності інтелектуального відновлення радіочастотних сигналів, а також методика їхнього нового представлення, що дозволить мінімізувати похибку реконструкції даних при втраті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз фундаментальних робіт у галузі штучного інтелекту [1, 2] свідчить про значний потенціал використання нейромережових моделей для розв'язання складних обчислювальних задач, де традиційні алгоритми виявляються недостатньо гнучкими. Особливий інтерес становлять підходи, що поєднують нейронні мережі з символічним штучним інтелектом, які вже розглядаються для застосування у військових системах для підвищення надійності прийняття рішень [3]. Крім того, використання згорткових нейронних мереж у навчанні з підкріпленням доводить можливість формування стійкої поведінки систем у динамічних і складних середовищах [4].

В умовах активної протидії і впливу завад критичного значення набуває живучість систем. Дослідження, що присвячені аналізу та моделюванню живучості складних систем [5], а також динамічних документальних структур [6], підкреслюють необхідність розробки таких методів представлення інформації, які би зберегли свою функціональну цілісність навіть у разі часткової втрати елементів. Це створює підґрунтя для розробки нових видів представлення сигналів, що є стійкими до деструктивного впливу.

Питання цифрової обробки сигналів (DSP) і їхньої передачі в мобільних комунікаціях детально висвітлено в працях [7, 9, 10]. Зокрема, значну увагу приділено методам цифрової компенсації і калібрування дисбалансів, що є критичним для точності відтворення сигналу на приймальній стороні [8]. Сучасні підходи до реалізації алгоритмів DSP, зокрема із використанням високорівневих мов програмування для аналізу та виконання швидкого перетворення Фур'є [11], дозволяють вичерпно видозмінювати та змінювати представлення сигналу в реальному часі.

Водночас, попри глибоке опрацювання окремих аспектів нейромережових технологій і цифрової обробки сигналів, питання розробки нового виду представлення сигналу, який би був адаптований саме під відновлення методами штучного інтелекту в умовах втрати частин даних, залишається розкритим лише частково. Більшість існуючих рішень зосереджені на класичній надмірності або корекції помилок, тоді як потенціал нейромережового відновлення структури сигналу з неповних даних потребує подальшого дослідження та формалізації.

Основна частина

Найбільш досконалим та універсальним способом представлення радіосигналів у сучасній цифровій обробці є використання I/Q-компонент. Перехід до I/Q-представлення зумовлений необхідністю реалізації складних видів квадратурної амплітудної модуляції (QAM) і фазової маніпуляції (PSK). Головна перевага цього підходу полягає у можливості розділення сигналу на два незалежні ортогональні канали, що дозволяє уникнути апаратних обмежень традиційних аналогових схем і забезпечує гнучкість при програмному управлінні параметрами сигналу. Це робить I/Q-модель стандартом для систем програмно-керованого радіо, де обробка відбувається безпосередньо на цифровій базі.

Суть I/Q-сигналу полягає у його розкладанні на дві складові, що зміщені по фазі відносно одна одної на 90 градусів. Синфазна складова (I — In-phase) описує-

ться функцією косинуса, а квадратурна складова (Q — Quadrature) — функцією синуса. Математично такий сигнал зручно представляти у комплексній формі:

$$(s(t) = I(t) + jQ(t)),$$

де (j) — уявна одиниця.

Кожна точка у представленні квадратурно-амплітудної модуляції, що представлена на рис. 1, відповідає вектору на комплексній площині, де довжина вектора визначає миттєву амплітуду сигналу, а кут нахилу — його миттєву фазу. Такий підхід дозволяє перетворити тригонометричні операції модуляції на прості арифметичні дії з векторами, що є критично важливим для швидкодії обчислювальних засобів.

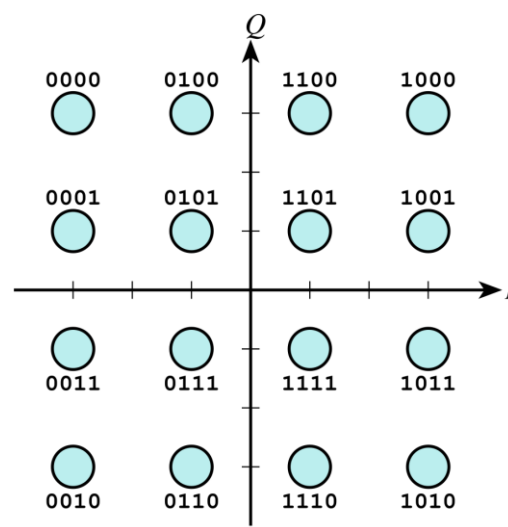


Рис. 1. Діаграма сигнального сузір'я для прямокутної 16-QAM

Опис сигналу через I/Q-компоненти дає змогу наглядно візуалізувати дані у вигляді сузір'їв (constellation diagrams), що відображають стани сигналу в дискретні моменти часу. Це забезпечує наочний аналіз якості передачі та виявлення спотворень. Оскільки компоненти I та Q є ортогональними, вони не інтерферують одна з одною за ідеальних умов, що теоретично подвоює інформаційну ємність каналу зв'язку. Така математична стрункість та універсальність роблять I/Q-представлення ідеальним входним об'єктом для алгоритмів машинного навчання, оскільки нейронні мережі можуть швидко працювати з двовимірними масивами числових значень, відновлюючи втрачену цілісність вектора при виникненні деструктивних завад.

Нове представлення радіосигналу із можливістю відновлення

У класичному підході радіосигнал представляється у вигляді комплексної послідовності ($s[n] = I[n] + jQ[n]$), яка безпосередньо відображає миттєві значення сигналу в часовій області. Такий спосіб є універсальним, однак він не враховує внутрішню структуру сигналу, зокрема його частотний розподіл та статистичні залеж-

ності між відліками. У задачах інтелектуального відновлення це призводить до підвищеної складності, оскільки модель змушена самостійно виявляти ці закономірності з неструктурованих даних. Тому доцільним є перехід до такого представлення, яке явно містить інформацію про енергетичний розподіл сигналу та його фазову структуру, що дозволяє зменшити простір пошуку при реконструкції.

Запропоноване представлення базується на переході від часової області до частотно-часової через швидке перетворення Фур'є. У цьому просторі сигнал описується як сукупність локальних спектральних компонент, що дозволяє відокремити корисну структуру від шуму. Далі комплексний спектр декомпонується на амплітудну та фазову складові:

$$S(f, t) = A(f, t)e^{j\phi(f, t)}.$$

Для підвищення чисельної стабільності використовується логарифмічне представлення амплітуди, в той час як фаза подається у вигляді безперервних функцій косинуса та синуса.

Така форма усуває розриви фази та забезпечує гладкість простору ознак, що є критично важливим для алгоритмів машинного навчання. З метою мінімізації похибки реконструкції у разі часткової втрати даних вводиться додаткове надлишкове кодування у вигляді спектральної маски відновлення.

Воно дозволяє формулювати задачу реконструкції як масштабування спектра. Це означає, що навіть при втраті частини часових відліків сигнал може бути відновлений через оцінку структури у частотно-часовому представленні, а не через пряме відтворення відсутніх значень. Таким чином, складність задачі переноситься з відновлення сирих даних до оцінки більш гладких і структурованих функцій.

Практична реалізація такого підходу може бути оформлена у вигляді структурованого контейнера даних, наприклад JSON-подібної структури, яка містить посилання на бінарні файли в яких знаходяться масиви $L(f, t)$, $\cos(\phi(f, t))$, $\sin(\phi(f, t))$ та $M(f, t)$, а також службові параметри (частота дискретизації, розмір вікна, крок перекриття).

Така організація дозволяє явно розділити інформаційні компоненти сигналу та забезпечує зручність зберігання, передачі та подальшої обробки. У результаті формується представлення, яке не лише зберігає основні властивості сигналу, але й створює сприятливі умови для його стійкого відновлення в умовах шумів і втрат.

Роль штучного інтелекту у відновленні радіосигналів із новим представленням

У задачі відновлення радіосигналу в запропонованому представленні доцільно застосовувати методи штучного інтелекту, що орієнтовані на обробку структурованих частотно-часових даних. Найбільш придатними є згорткові нейронні мережі та їхні варіації, зокрема архітектури типу encoder-decoder, вони добре працюють зі структурованими масивами даних, зокрема двовимірними представленнями подібних до спектрограм. Такі моделі здатні виявляти локальні закономірності у частотно-часовому представленні та враховувати як енергетичну структуру сигналу, так і фазові залежності. Альтернативно можуть використовуватися гібридні підходи, що поєднують згорткові шари з рекурентними або трансформерними бло-

ками для врахування довгострокових залежностей у часі, однак базові згорткові архітектури залишаються оптимальними з точки зору обчислювальної складності та стабільності навчання.

Навчання моделі здійснюється на парних даних, що містять спотворені та еталонні представлення одного й того ж сигналу. Як вхідні дані використовується сформований тензор, який включає логарифмічну амплітуду та тригонометричні компоненти фази для сигналу, що зазнав впливу шуму, частотного зсуву та інших типових радіочастотних спотворень. Цільовими даними виступає відповідне представлення чистого сигналу або ж допоміжна функція, що описує необхідну корекцію спектра. Такий підхід дозволяє моделі навчитися відображенню між зашумленим і відновленим сигналом у просторі ознак, де структура сигналу вже явно представлена і не потребує додаткового виділення.

Процес відновлення полягає у застосуванні навченої моделі до нових, раніше не бачених даних. Модель отримує на вході спотворене частотно-часове представлення і генерує оцінку його очищеної версії або коригуючої маски. Важливо, що в цьому представленні задача відновлення зводиться не до реконструкції кожного окремого відліку сигналу, а до корекції більш гладких і структурованих компонент, таких як амплітудний розподіл і узгоджена фазова структура. Це суттєво знижує складність задачі та дозволяє досягати кращих результатів навіть за умов значного рівня шуму або часткової втрати даних. Зашумлений і спотворений сигнал продемонстровано на рис. 2.

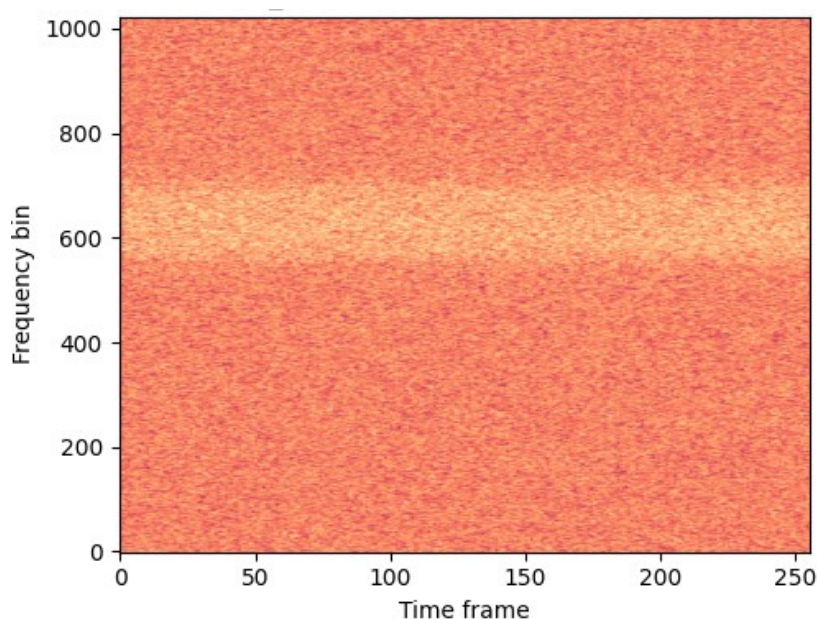


Рис. 2. Зашумлений і спотворений сигнал

Завершальний етап полягає у перетворенні відновленого представлення назад у часову область. Після отримання скоригованих амплітудних і фазових компонент формується комплексний спектр, який піддається оберненому перетворенню. Та-

ким чином, штучний інтелект виступає як ключовий елемент, який забезпечує перехід від пошкодженого сигналу до його узгодженої спектральної інтерпретації, що, у свою чергу, дозволяє відновити часову форму сигналу з мінімальною похибкою.

Розглянемо типовий приклад прийому цифрового радіосигналу з фазовою модуляцією, який у класичному вигляді представлений як послідовність I/Q-відліків. У процесі передачі сигнал зазнає впливу адитивного шуму, частотного зсуву та фазових нестабільностей, унаслідок чого в часовій області він виглядає як сильно спотворена комплексна послідовність без очевидної структури. У такому вигляді інтелектуальне відновлення вимагає від моделі одночасно вирішувати кілька задач: виявляти спектральну структуру, компенсувати фазу та пригнічувати шум. Натомість при переході до запропонованого частотно-часового представлення цей самий сигнал перетворюється у спектральну форму, де енергія концентрується у характерних областях, а фаза представлена у злагодженому вигляді через синус і косинус. Після обробки згортковою нейронною мережею модель формує очищене представлення, в якому спектральні компоненти стають більш чіткими, а шумові складові пригнічуються.

У результаті застосування моделі до спотвореного сигналу отримується відновлений спектр, який відрізняється від початкового кращим співвідношенням сигналу до шуму. Перетворення у частотно-часове представлення призведе до значного покращення якості сигналу, а саме зменшиться рівень шуму, компенсується частотний зсув буде компенсовано, а форма сигналу наблизиться до еталонної. Очищений сигнал продемонстровано на рис. 3. Важливо, що навіть за часткової втрати даних відновлення залишається можливим, оскільки модель оперує не окремими відліками, а узагальненою структурою сигналу в частотно-часовому просторі.

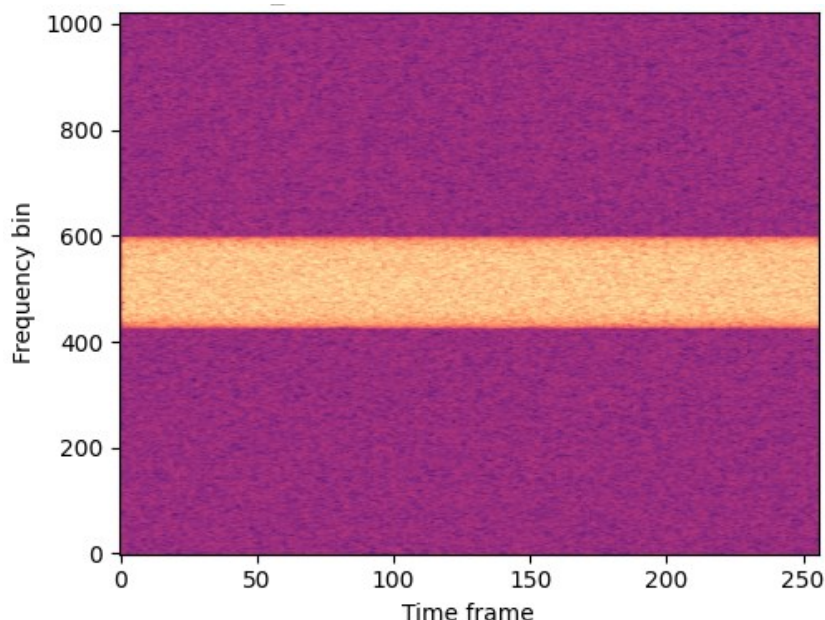


Рис. 3. Відновлений сигнал

При порівнянні із класичним I/Q-представленням новий підхід показує, що у випадку прямої роботи з комплексними відліками, здатність його відновлення набуває більшої стійкості до спотворень. Але такий підхід потребує більш складних моделей для досягнення подібної якості. У новому представленні сигнал описується через його фізично значущі характеристики, що дозволяє зменшити складність задачі та підвищити точність реконструкції. Таким чином, поєднання структурованого представлення та методів штучного інтелекту забезпечує більш стійке та стабільне відновлення радіосигналів порівняно з традиційним підходом.

Висновок

У ході дослідження було розроблено та обґрунтовано новий вид представлення радіосигналу, що є критично важливим для забезпечення живучості сучасних інформаційних комп'ютерних систем у нестабільних умовах експлуатації. Запропоноване представлення значно сприяє підвищенню відмовостійкості систем, оскільки воно цілеспрямовано знижує чутливість до зовнішніх шумів і деструктивних завад, що виникають унаслідок роботи засобів РЕБ або апаратних збоїв. Завдяки оптимізації структури даних вдалося суттєво знизити обчислювальні вимоги до апаратної частини, що дозволяє реалізовувати складні алгоритми відновлення у реальному часі навіть на мобільних чи автономних платформах із обмеженими ресурсами. Це створює надійний фундамент для стабільного прийняття рішень на основі штучного інтелекту, мінімізуючи ризики каскадних помилок при аналізі спотвореної інформації.

Ключовою перевагою розробленого підходу є можливість відтворення втрачених фрагментів даних за допомогою нейромережових моделей. На відміну від класичних методів інтерполяції, інтегрований ШІ оперує контекстними закономірностями сигналу, що дозволяє з високою точністю реконструювати його фазову та амплітудну структуру навіть при значних розривах у потоці I/Q-компонент. У результаті застосування даної методики перетворює звичайну обробку сигналів на інтелектуальну самовідновлювану структуру, яка забезпечує безперервність функціонування програмних і апаратних комплексів. Такий підхід відкриває нові перспективи для створення наступного покоління засобів радіомоніторингу та зв'язку, здатних зберігати повну функціональну здатність у складних дестабілізуючих ситуаціях.

1. Нейронні мережі: теорія та практика: навч. посіб. / С. О. Субботін. — Житомир: Вид. О.О. Євенок, 2020. 184 с. ISBN 978-966-995-189-2. URL: <https://eir.zp.edu.ua/server/api/core/bitstreams/2abb401b-9ee6-4afc-a92a-2de5c332d12f/content>

2. Колесницький О.К., Месюра В.І. Нейромережові моделі та технології обчислювального інтелекту. Нейрокомп'ютери. Частина I. Вінниця: ВНТУ, 2021. 66 с.

3. Hagos D.H., & Rawat D.B. Neuro-symbolic ai for military applications. IEEE Transactions on Artificial Intelligence. 2024.

4. Cannon C.T., & Goericke S. Using convolution neural networks to develop robust combat behaviors through reinforcement learning (Doctoral dissertation, Monterey, CA; Naval Postgraduate School). 2021.

5. Додонов О. Г., Кузнецова М. Г., Горбачик О. С. Живучість складних систем: аналіз та моделювання: навч. посіб. у 2-х ч. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 264 с.

6. Додонов А.Г., Ландэ Д.В. Живучість інформаційних сюжетів як динамічних документальних систем. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2010. Т. 13, № 2. С. 88–102.
7. Jung K., Mersereau R. M. *Media and radio signal processing for mobile communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 494 p.
8. Anttila L., Zou Y., Valkama M. Digital compensation and calibration of I/Q gain and phase imbalances. *Digital Front-End in Wireless Communications and Broadcasting*. Cambridge University Press, 2011. P. 450–478.
9. Likert A. R. *Digital signal processing in communications systems*. 2019. 320 p.
10. Reddy G. J. *Digital signal processing*. 1st ed. Hyderabad: BS Publications, 2016. 396 p.
11. Amatsuki K. *Digital signal processing with C++: master real-time signal analysis, filtering, FFT algorithms, and advanced DSP techniques with professional C++*. Kindle ed. 2025. 242 p.

Надійшла до редакції 15.04.2026

Прийнята до друку 19.05.2026

Опублікована 17.06.2026