

УДК 621.396:004.89

Volodymyr Dziuba, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9576-814X> **e-mail:** navvon@ukr.net

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR IMPROVING THE ACCURACY OF MULTISTATIC LOCALIZATION OF RADIO EMISSION SOURCES

Abstract. *The study addresses the scientific and practical problem of improving the accuracy of localization of radio emission sources (RES) in the high-frequency (HF) band by combining classical direction-finding and amplitude analysis methods with modern intelligent technologies. The relevance of the problem is determined by the fact that traditional methods for determining the coordinates of signals largely depend on ionospheric disturbances, geomagnetic activity, and intentional electronic countermeasures, which significantly reduce their effectiveness.*

The aim of the study is to develop a multistatic architecture of software-defined receivers with embedded convolutional neural network (CNN) modules capable of analyzing spectral-spatial signal characteristics and identifying hidden patterns in input data. The paper describes the principles of constructing algorithms for joint processing of amplitude and angular information, taking into account the electrophysical parameters of the ionosphere and factors of electromagnetic inaccessibility. Simulation results confirmed that the application of a hybrid approach makes it possible to reduce the uncertainty area of localization to 8–30% of its initial size.

Special attention is given to the analysis of localization errors, their physical causes, and minimization methods, which ensure stability and reliability of the system even under conditions of electromagnetic countermeasures. The proposed approach enhances the efficiency of radiomonitoring and electronic intelligence systems.

Keywords: *information technologies, ecosystem, marine waters, geographic information systems, control system, military influence, spectral channels, remote methods.*

В.А. Дзюба

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, м. Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Анотація. *Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання, що полягає у підвищенні точності локалізації джерел радіовипромінювання (ДРВ) у короткохвильовому (КХ) діапазоні шляхом поєднання класичних методів пеленгації та амплітудного аналізу із сучасними інтелектуальними технологіями. Актуальність проблеми зумовлена тим, що традиційні методи визначення координат сигналів значною мірою залежать від впливу іоносферних збурень, геомагнітної активності та навмисних радіоелектронних перешкод, що суттєво знижує їхню ефективність.*

Метою дослідження є розробка багатопозиційної архітектури програмно-керованих приймачів із вбудованими модулями згорткових нейронних мереж (CNN), які здатні аналізувати спектрально-просторові характеристики сигналів та виявляти приховані закономірності у вхідних даних. У роботі описано принципи побудови алгоритмів сумісної обробки амплітудної та кутової інформації, що враховують електрофізичні параметри іоносфери та фактори електромагнітної недоступності. Проведено моделювання, результати якого підтвердили, що застосування гібридного підходу дозволяє зменшити область невизначеності місцезнаходження до 8–30% від початкової. Особливу увагу приділено аналізу похибок локалізації, їхнім фізичним причинам і методам мінімізації, що забезпечує стійкість і надійність системи навіть в умовах електромагнітного протидіювання. Запропонований підхід сприяє підвищенню ефективності систем радіомоніторингу та радіоелектронної розвідки.

Ключові слова: інформаційні технології, екосистема, морські акваторії, геоінформаційні системи, система керування, військовий вплив, спектральні канали, дистанційні методи.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.116-122>

Вступ

У сучасних умовах стрімкого розвитку засобів зв'язку та інформаційного впливу, завдання точного й оперативного виявлення джерел радіовипромінювання (ДРВ) набуває особливої актуальності в контексті забезпечення національної безпеки, моніторингу електромагнітного середовища та протидії радіоелектронним загрозам. Особливо складними є умови локалізації таких джерел у короткохвильовому (КХ) діапазоні, де сигнали зазнають значних спотворень під впливом іоносфери, неоднорідного середовища поширення та радіоелектронного протидіювання.

Традиційні методи пеленгації та тріангуляції, незважаючи на свою простоту й широке застосування, демонструють обмежену ефективність в умовах нестабільності електромагнітного середовища. Зокрема, залежність характеристик поширення сигналу від добових, сезонних та геомагнітних змін у іоносфері унеможливорює гарантування сталої точності локалізації.

У зв'язку з цим виникає об'єктивна потреба у створенні адаптивних систем нового покоління, здатних забезпечити точне визначення координат джерел навіть за умови фрагментарного або спотвореного сигналу. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є застосування методів штучного інтелекту, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN), які здатні опрацьовувати просторово-спектральну інформацію та виявляти приховані закономірності у вхідних даних.

У даній статті запропоновано комплексний підхід до локалізації ДРВ у КХ-діапазоні, що базується на багатопозиційній архітектурі системи спостереження з адаптивними обчислювальними модулями. Об'єднання амплітудного та кутового аналізу з методами глибинного навчання дозволяє суттєво зменшити зону невизначеності розташування джерел та підвищити надійність роботи системи в умовах перешкод. Таким чином, дана робота спрямована на вирішення важливої прикладної проблеми – підвищення точності місцевизначення джерел радіосигналів в умовах складного електромагнітного середовища – шляхом синергії класичних методів радіолокації та сучасних інтелектуальних алгоритмів обробки даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових дослідженнях останніх років (наприклад, [1]–[6]) значна увага приділяється розвитку методів пеленгації та місцевизначення у складних умовах поширення радіосигналів.

Класичні методи, зокрема триангуляційні схеми та амплітудні оцінки, розглядаються як базові інструменти у побудові систем радіомоніторингу, однак їх ефективність суттєво знижується при збуреннях у іоносфері або впливі перешкод.

Особливої актуальності набуває застосування методів штучного інтелекту для обробки сигналів у радіоелектронних системах. Зокрема, згорткові нейронні мережі (CNN) успішно використовуються для аналізу просторово-спектральних характеристик сигналів [9], що дозволяє адаптуватися до умов неповної електромагнітної доступності. У дослідженнях [7], [8] розглянуто моделі іоносфери (NeQuick, IRI), які враховуються при прогнозуванні затухань та відхилень у каналі передачі.

Окремі праці присвячено питанню створення гібридних підходів, які поєднують пеленгацію та амплітудний аналіз із елементами глибинного навчання. Проте більшість із них не враховує динамічну природу радіосередовища та не розглядає сценарії бойового застосування, де важливою є здатність системи до роботи з фрагментарними або зашумленими сигналами в реальному часі.

Таким чином, у сучасній науковій літературі існує певний розрив між класичними методами обробки радіосигналів та інтелектуальними підходами до локалізації джерел. Цей розрив і покликана заповнити запропонована у статті концепція гібридної адаптивної системи.

Мета роботи. Метою статті є підвищення точності визначення координат джерел радіовипромінювання у короткохвильовому діапазоні шляхом поєднання методів амплітудного та кутового аналізу із застосуванням згорткових нейронних мереж.

Об'єктом дослідження є процес багатопозиційної локалізації джерел радіосигналів із використанням програмно-керованих приймачів та нейромережових модулів у складних умовах електромагнітного середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сучасні методи пеленгації та амплітудного аналізу сигналів у короткохвильовому діапазоні мають суттєві обмеження, що зумовлено складністю поширення електромагнітних хвиль у середовищі з іоносферними збуреннями та дією зовнішніх перешкод. Тому виникає необхідність у використанні більш гнучких і адаптивних підходів, які дозволяють інтегрувати різноманітні дані та підвищувати точність локалізації джерел радіовипромінювання.

У даній роботі було проведено дослідження ефективності багатопозиційних конфігурацій систем радіомоніторингу, що базуються на програмно-керованих приймачах із вбудованими адаптивними модулями. Для аналізу застосовувалися методи системного та спектрального моделювання, які дали змогу оцінити вплив іоносферних факторів на параметри короткохвильових сигналів.

Ключовим елементом дослідження стало використання згорткових нейронних мереж (CNN), здатних обробляти багатовекторні дані амплітудного

та кутового аналізу. Навчання нейромережі здійснювалося на синтетичному датасеті, що містив понад 10 000 варіацій координат джерел та параметрів сигналів. Для оптимізації процесу було використано функцію втрат середньоквадратичної похибки (MSE) та алгоритм Adam із початковим коефіцієнтом навчання 0.001.

Окрім нейромережевої обробки, застосовувалися й класичні методи адаптивної фільтрації та згладжування, які забезпечували зменшення впливу шумів і перешкод. Для оцінки точності моделі використовувалися метрики середньоквадратичної похибки та інтегральної області невизначеності, що дозволило отримати кількісні показники ефективності запропонованого підходу.

Експериментальні випробування проводилися у змодельованому середовищі, яке враховувало реальні фактори електромагнітного протидіювання, зокрема зниження співвідношення сигнал/шум до 3 дБ, а також дію навмисних перешкод. Отримані результати підтвердили, що запропонований метод забезпечує високу стійкість та придатність до практичного застосування в системах радіомоніторингу та радіоелектронної розвідки, істотно перевищуючи точність класичних підходів.

У процесі моделювання багатопозиційної системи місцевизначення джерел радіовипромінювання реалізовано інтеграцію амплітудного аналізу та пеленгаційної інформації, яка у класичному варіанті використовується для розв'язання задач тріангуляції. Основна ідея дослідження полягає у тому, що використання лише однієї характеристики сигналу (амплітуди або напрямку приходу) призводить до значних похибок, особливо у випадках нестабільності іоносфери та дії штучних перешкод. Тому було обрано комбінований підхід, який дозволяє узгоджено аналізувати дані від кількох приймачів та формувати більш точні координатні оцінки.

Математична модель комбінованого підходу, нехай у багатопозиційній системі є m приймачів, що розташовані у відомих координатах $s_i = (x_i, y_i)i$. Кожен приймач формує пару спостережень:

- амплітуду сигналу A_i ,
- кут приходу θ_i .

Тоді задача оцінки координат джерела $\vec{r} = (x, y)$ формулюється як задача мінімізації узагальненої функції похибки:

$$\hat{\vec{r}} = \arg \min_{\vec{r}} J(\vec{r}), \quad (1)$$

де

$$J(\vec{r}) = \alpha \sum_{i=1}^m \left(A_i - \tilde{A}(\vec{r}, s_i) \right)^2 + \beta \sum_{i=1}^m \left(\theta_i - \tilde{\theta}(\vec{r}, s_i) \right)^2, \quad (2)$$

де $\tilde{A}(\vec{r}, s_i)$ та $\tilde{\theta}(\vec{r}, s_i)$ – модельні значення амплітуди та напрямку для точки r , а коефіцієнти α та β задають вагу кожного типу спостережень. Такий підхід дозволяє адаптивно налаштовувати баланс між амплітудною і кутовою складовими залежно від рівня шуму та умов поширення сигналів.

Задача була модифікована шляхом використання згорткової нейронної мережі (CNN), яка апроксимує нелінійне відображення:

$$f: (A_1, \theta_1, \dots, A_m, \theta_m) \mapsto (x, y). \quad (3)$$

Для навчання нейромережі використано синтетичний датасет із понад 104 комбінацій координат джерел та відповідних параметрів сигналів. Вхідні дані були нормалізовані та подані у вигляді матриць спектрально-просторових ознак. Функція втрат визначалася як середньоквадратична похибка:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2], \quad (4)$$

де N – кількість прикладів у вибірці, $\vec{r}_i = (x_i, y_i)$ – справжні координати джерела, $\hat{\vec{r}}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ – прогнозовані координати.

Навчання здійснювалося протягом 100 епох з використанням оптимізатора Adam ($\text{lr} = 0.001$) та розміру батчу 128. У результаті було отримано стале зниження похибки локалізації, що свідчить про ефективність глибокого навчання у задачах багатопозиційної локалізації.

Проведений експеримент показав, що середня точність локалізації за класичним амплітудним методом становила близько $28.5 \text{ км} \times 28.5 \text{ км}$, тоді як пеленгаторний метод зменшив похибку до $21.3 \text{ км} \times 21.3 \text{ км}$. Комбінований підхід без використання нейромереж дозволив досягти точності у $12.8 \text{ км} \times 12.8 \text{ км}$, а застосування CNN дало середню похибку $6.5 \text{ км} \times 6.5 \text{ км}$. Таким чином, відносне покращення у порівнянні з базовими методами становить від 55% до 70%.

Нижче у табл. 1 наведено результати порівняльного аналізу точності локалізації джерел радіовипромінювання різними методами.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз точності локалізації джерел радіовипромінювання різними методами

Метод	Середня похибка, км	Зменшення області, %
Амплітудний	28.5	–
Пеленгаторний	21.3	–
Комбінований (без CNN)	12.8	55
Комбінований з CNN	6.5	82

Зменшення області невизначеності можна формально описати через інтегральний показник:

$$\Delta\Omega = \frac{\Omega_{\text{баз}} - \Omega_{\text{CNN}}}{\Omega_{\text{баз}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де $\Omega_{\text{баз}}$ – площа області ймовірного розташування джерела за класичними методами, Ω_{CNN} – площа після застосування нейромережевої моделі.

Для нашого випадку $\Delta\Omega \approx 82\%$, що підтверджує значне зростання точності.

Отримані результати свідчать, що поєднання амплітудного та кутового аналізу з нейромережевою обробкою даних є більш стійким до впливу шумів та іоносферних спотворень. В умовах низького співвідношення сигнал/шум (до 3 дБ) система зберігала здатність визначати координати з похибкою менше 10% від контрольованої області, що робить її придатною для використання в умовах електронної боротьби та мобільного розгортання систем радіомоніторингу.

Таким чином, результати підтверджують наукову та прикладну цінність запропонованого підходу, а також відкривають перспективи його подальшої інтеграції у практичні системи зв'язку та безпеки.

Висновки

У даній роботі запропоновано та реалізовано нову концепцію багатопозиційного місцевизначення джерел радіовипромінювання у короткохвильовому діапазоні, яка базується на інтеграції амплітудних та напрямкових методів із алгоритмами штучного інтелекту. Використання згорткових нейронних мереж (CNN) дало змогу суттєво підвищити точність визначення координат, зменшивши середню похибку локалізації більш ніж удвічі порівняно з класичними методами.

Отримані результати показали, що застосування CNN дозволяє значно зменшити область ймовірного розташування джерела сигналу, навіть за умов низького співвідношення сигнал/шум та нестабільного іоносферного каналу. Це підтверджує доцільність поєднання традиційних методів обробки сигналів із сучасними нейромережевими підходами для вирішення задач радіомоніторингу та радіоелектронної розвідки.

Особливістю запропонованої методики є її адаптивність, що дає можливість ефективно функціонувати при фрагментарних або зашумлених даних. Такий підхід є перспективним для використання в умовах електромагнітного протистояння, мобільних радіосистем і розподілених сенсорних мереж.

Найближчі напрями подальших досліджень передбачають:

- впровадження методів геопросторової прив'язки отриманих координат до супутникових платформ і систем ГС, що забезпечить масштабний оперативний моніторинг у режимі реального часу;
- аналіз та застосування інших нейромережових архітектур, зокрема LSTM та ResNet, для врахування часових залежностей та підвищення стійкості системи до динамічних змін середовища поширення сигналів;
- створення дослідного зразка системи для апробації у реальних умовах, включно з бойовим застосуванням, з метою оцінки її ефективності у ситуаціях із навмисними радіоелектронними перешкодами;
- адаптацію моделі до середньохвильового та ультракороткохвильового (УКХ) діапазонів, що дозволить розширити сферу використання та забезпечити універсальність системи.

Таким чином, робота робить вагомий внесок у розвиток методів інтелектуального місцевизначення радіосигналів і відкриває широкі можливості для подальших досліджень, спрямованих на інтеграцію радіотехнічних та штучно-інтелектуальних підходів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Signalov, Yu. I. (2020). Teoriia ta praktyka RER [Theory and practice of electronic intelligence]. Kharkiv: KhNURE, 168, 85–88 [in Ukrainian].
2. Varlamov, I. D., & Hatsenko, S. S. (2014). Model informatsiinykh potokiv u suputnykovykh systemakh [Model of information flows in satellite systems]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 4, 47–56 [in Ukrainian].

3. Tymoshenko, V. A. (2018). Nechitki systemy ta shtuchnyi intelekt [Fuzzy systems and artificial intelligence]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
4. Havryliuk, A. S. (2022). Systemy tekhnichnoi rozvidky v suchasnomu boiu [Systems of technical intelligence in modern combat]. *Zbirnyk naukovykh prats NUOU* [in Ukrainian].
5. Melnyk, V. P. (2018). Metody pidvyshchennia zavadostiikosti suputnykovykh kanaliv zviazku v diapazonakh C ta Ku [Methods of increasing noise immunity of satellite communication channels in C and Ku bands]. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska Politekhnikha"*, 895, 102–108 [in Ukrainian].
6. Trysnyuk, V., Yehorov, V., Tymchuk, S., & Trysnyuk, T. (2022). Geo-information system for ensuring the functioning of the VHF range radio direction finding network. *Proceedings of ITTAP 2022*, 117–123.
7. Maral, G., & Bousquet, M. (2017). Satellite communications systems: Systems, techniques and technology. Hoboken: Wiley, 880.
8. Stallings, W. (2020). Wireless communications and networks (2nd ed.). Pearson Education.
9. Russell, S., & Norvig, P. (2010). Artificial intelligence: A modern approach (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2025 і прийнята до друку після рецензування 26.05.2025

The article was received 03.03.2025 and was accepted after revision 26.05.2025

Дзюба Володимир Андрійович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9576-814X> **e-mail:** navvon@ukr.net