

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-7>

УДК 621.396.969.1

ПОЛІКАРОВСЬКИХ Олексій

Одеський національний морський університет

<https://orcid.org/0000-0002-1893-7390>

E-mail: polalexey@gmail.com

ГУЛА Ігор

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4434-5794>

E-mail: hulaib@khmnu.edu.ua

ГАВРОНСЬКИЙ Віталій

Хмельницький політехнічний фаховий коледж

<https://orcid.org/0000-0002-1529-1272>

ІНТЕРФЕРОМЕТРИ У РАДІОСИСТЕМАХ ОХОРОНИ ПЕРИМЕТРУ НА БАЗІ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНОГО РАДІО

У статті досліджено застосування програмно-конфігурованого радіо (SDR) у радіосистемах охорони периметру. Розглянуто інтерферометричний метод пеленгування як один із найточніших способів визначення напрямку на джерело радіовипромінювання. Проведено моделювання залежності кута приходу сигналу від різниці фаз для параметрів $\lambda_0=0,3$ м і $d=0,15$ м, що відповідають частоті 1 ГГц. Отримані результати підтверджують ефективність SDR-реалізації пеленгатора для виявлення безпілотних літальних апаратів у системах охорони периметру.

Ключові слова: програмно-конфігуроване радіо, SDR, пеленгування, інтерферометр, система охорони периметру.

POLIKAROVSKYKH Oleksiy

Odessa National Maritime University

HULA Ihor

Khmelnytskyi National University

HAVRONSKYY Vitaliy

Khmelnytskyi Polytechnic Vocational College

INTERFEROMETERS IN RADIO PERIMETER SECURITY SYSTEMS BASED ON SOFTWARE-CONFIGURED RADIO

This paper investigates the implementation of Software-Defined Radio (SDR) technology in modern perimeter security systems with an emphasis on interferometric direction-finding (DF) methods. The study presents an analytical and simulation-based examination of correlation interferometry as an efficient approach to determining the direction of arrival (DoA) of radio emissions from potential threats, including unmanned aerial vehicles (UAVs). A mathematical model of a two-antenna interferometer was developed, and a numerical experiment was conducted to estimate the dependence between phase difference and signal arrival angle for parameters $\lambda_0 = 0.3$ m and $d = 0.15$ m, corresponding to a frequency of approximately 1 GHz. This frequency range (800–1800 MHz) is characteristic of UAV control, telemetry, and navigation channels, making it highly relevant for perimeter monitoring applications.

The results confirm the nonlinear nature of the relationship between phase shift and incident angle, consistent with theoretical expectations. It was found that when the antenna spacing equals half the wavelength ($d = \lambda_0/2$), the system provides an unambiguous angle estimation in the $0-90^\circ$ range, with optimal precision observed for small angles ($\leq 30^\circ$). The proposed SDR-based implementation of the interferometer offers adaptability, digital calibration, and real-time reconfigurability, allowing dynamic adjustment of processing algorithms and operating frequencies without hardware replacement.

Furthermore, the paper discusses practical aspects of system design, including the impact of antenna array geometry, synchronization of reception channels, and mitigation of multipath and interference effects. The obtained data substantiate that SDR-based interferometric DF systems combine the flexibility of digital signal processing with high angular accuracy, enabling effective detection and localization of unauthorized emitters. The results can be used in the development of integrated security infrastructures, drone countermeasure systems, and advanced radiomonitoring platforms that utilize artificial intelligence for signal classification and adaptive perimeter defense.

Keywords: Software-Defined Radio, SDR, interferometry, direction finding, correlation interferometer, phase difference, perimeter security, UAV detection, radio monitoring.

Стаття надійшла до редакції / Received 30.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.11.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У сучасних умовах зростання рівня загроз для критичної інфраструктури, промислових об'єктів, військових баз та приватних територій особливої актуальності набуває питання створення ефективних систем охорони периметру. Такі системи повинні забезпечувати безперервний контроль визначеної зони, оперативне виявлення спроб несанкціонованого проникнення, а також стійкість до природних та штучних завад.

Традиційні технічні засоби охорони, побудовані на фіксованих апаратних рішеннях, не завжди здатні адаптуватися до змін середовища чи нових видів загроз. Це зумовлює потребу у впровадженні технологій, що поєднують високу гнучкість, програмну керованість і можливість швидкої модернізації без заміни апаратної частини.

Одним із найперспективніших напрямів розвитку сучасних систем радіомоніторингу та охорони є використання програмно-конфігурованого радіо (Software-Defined Radio, SDR). Суть цієї технології полягає у тому, що більшість функцій традиційного радіо – модуляція, демодуляція, фільтрація, обробка сигналів, аналіз спектра — виконуються не апаратними компонентами, а спеціальним програмним забезпеченням. Це дозволяє реалізовувати в одному пристрої декілька типів радіосистем, оперативно змінювати частотний діапазон, стандарти зв'язку чи методи виявлення об'єктів. Таким чином, SDR відкриває можливості створення адаптивних і інтелектуальних систем охорони, здатних автоматично реагувати на зміну зовнішніх умов або появу радіоперешкод.

Завдяки своїй універсальності програмно-конфігуроване радіо може ефективно інтегруватися з сенсорними мережами, бездротовими системами зв'язку та аналітичними платформами, що використовують штучний інтелект. Це забезпечує підвищення точності виявлення цілей, зниження ймовірності помилкових спрацьовувань і формування комплексного підходу до охорони територій. Отже, дослідження можливостей застосування SDR у радіосистемах охорони периметру є важливим етапом у розвитку сучасних технологій безпеки, спрямованих на підвищення надійності, автономності та інтелектуалізації процесів моніторингу.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Питання забезпечення захисту радіоефіру та виявлення потенційних загроз у зонах охорони об'єктів критичної інфраструктури набуває все більшої актуальності у зв'язку з розширенням спектру бездротових технологій та підвищенням ризику кібератак через радіоканали. Сучасні системи охорони периметру повинні не лише фізично контролювати територію, але й аналізувати електромагнітну обстановку, виявляючи сторонні або підозрілі джерела радіовипромінювань.

Захист радіоефіру об'єкта охорони передбачає запобігання несанкціонованому доступу до інформації, що передається або приймається поблизу об'єкта. Одним із ключових методів є радіомоніторинг, який дає змогу фіксувати аномальну активність у спектрі та локалізувати джерела сигналів за допомогою пеленгації. Програмно-конфігуровані радіосистеми (SDR) дозволяють реалізувати такі функції в гнучкому, адаптивному форматі без потреби у зміні апаратної бази.

Використання SDR у сфері охоронних систем дозволяє автоматично виявляти джерела небезпечних сигналів, аналізувати рівень активності у радіоефірі та виявляти несанкціоновані передавачі — наприклад, підставні точки доступу Wi-Fi, IMSI-пастки або безпілотні літальні апарати з радіоканалами керування [1]. У таких системах SDR приймачі застосовуються як основний елемент для побудови антенних решіток і фазових інтерферометрів, що дозволяє одночасно вести моніторинг у широкому частотному діапазоні.

Розвиток методів пеленгації має глибоке історичне підґрунтя. Починаючи з рамок пеленгаторів Герца (1888 р.), яке поклало початок розвитку спрямованих антен, а перші пеленгатори склалися з рамок або дипольних антен, які вручну обертати для встановлення напрямку на джерело сигналу [1].

У 1906–1919 роках були створені системи Белліні-Тозі та Еджкока, які вперше дозволили здійснювати нерухоме пеленгування за амплітудою сигналів з кількох антен. Ці конструкції заклали основу для амплітудних методів пеленгування.

В 40-50 роках XX століття з'явилися системи Ватсона-Ватта і Вулленвебера, які використовували багатоканальні антенні решітки для одночасного прийому сигналів з різних напрямків. Згодом були розроблені доплерівські та псевдодоплерівські методи, що базувалися на вимірюванні частотного зсуву при обертанні або електронному перемиканні антен [2].

Нехай ненаправлена по горизонталі антена буде обертатися з кутовою частотою Ω по колу радіуса R в полі, що створюється віддаленим передавачем електромагнітних коливань частоти ω_0 . Миттєве значення різниці фаз між сигналом, прийнятим антеною, що обертається, і сигналом, прийнятим у центрі обертання. Це різниця фаз хвилі через зміну положення антени у просторі

$$\varphi_A = \frac{2\pi R}{\lambda_0} \sin(\Omega t + \theta), \quad (1)$$

де R – радіус обертання антени, λ_0 – довжина хвилі, Ω – кутова швидкість обертання антени, θ – кутова координата напрямку на джерело сигналу (кут приходу хвилі), t – час, що визначає поточне положення антени під час обертання, $2\pi R / \lambda_0$ – максимальна фаза коливання, яка характеризує амплітуду зміни фази сигналу через рух антени в полі хвилі. Визначає “глибину” доплерівської модуляції.

Такі системи відзначалися високою точністю, швидкодією та широким частотним діапазоном. У 1970–1990-х роках розвиток цифрової техніки привів до появи фазових та інтерферометричних методів

пеленгування, які використовували цифрову обробку сигналів (ЦОС). Завдяки цьому стало можливим реалізувати алгоритми високої роздільної здатності, зокрема MUSIC (MultipleSignalClassification) та ESPRIT, що дозволяють визначати напрямки приходу кількох сигналів одночасно [3].

У сучасних системах пеленгування використовуються такі основні методи: амплітудні методи – базуються на порівнянні рівнів сигналів, прийнятих різними антенами, і дають змогу визначати напрямки на джерело за максимумом або мінімумом амплітуди; фазові методи – передбачають вимірювання різниці фаз між сигналами, що надходять до різних антен; інтерферометричні методи – реалізують обчислення кутів приходу сигналів за різницею часу або фази між антенними елементами; методи на основі статистичних оцінок – алгоритми типу MUSIC або ESPRIT обробляють коваріаційну матрицю сигналів і забезпечують виявлення кількох джерел навіть у складних умовах багатопроменевого прийому [4].

Амплітудні методи прості у реалізації, але обмежені за точністю. Фазові системи мають високу точність, однак вимагають калібрування фазових зсувів і синхронізації каналів. Інтерферометричні методи за рахунок використання ЦОС дозволяють досягати точності до часток градуса.

У системах охорони периметру пеленгаційні методи застосовуються для виявлення сторонніх пристроїв, таких як IMSI-пастки, дрони з радіомодулями, підроблені точки доступу Wi-Fi або Bluetooth-трансивери. Пеленгація у поєднанні з аналітикою сигналів дозволяє визначати місцезнаходження джерел та класифікувати їх за типом випромінювання.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Одним із найбільш ефективних підходів до визначення напрямку на джерело радіовипромінювання у сучасних охоронних системах є кореляційна інтерферометрія. Інтерферометри належать до класу систем пеленгування, що базуються на принципі інтерферометрії, і вважаються одними з найефективніших серед відомих методів визначення напрямку на джерело сигналу [4]. На відміну від амплітудних або доплерівських методів, інтерферометричний підхід ґрунтується не лише на аналогових вимірюваннях — він потребує цифрової обробки сигналів, складність якої залежить від конфігурації антенної решітки. Саме тому практична реалізація таких систем стала можливою лише з появою мікропроцесорних засобів у 1980-х роках.

Суть методу полягає у визначенні кута приходу електромагнітної хвилі за рахунок аналізу різниці фаз між сигналами, прийнятими двома або більше антенами, рознесеними у просторі. Ця різниця фаз виникає внаслідок різниці шляхів, які проходить хвиля до кожного антенного елемента. Якщо ми маємо 2D антенну решітку (наприклад, горизонтальну), тоді формула має вигляд

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sin(\theta) \quad (2)$$

де d – відстань між антенами, λ_0 – довжина хвилі прийнятого сигналу, θ – кут між напрямком на джерело сигналу та нормаллю до осі бази антен. Визначає напрям, з якого приходить хвиля.

Звідки:

$$\sin \theta = \frac{\lambda_0 \Delta\varphi}{2\pi d} \quad \Rightarrow \quad \theta = \arcsin\left(\frac{\lambda_0 \Delta\varphi}{2\pi d}\right) \quad (3)$$

Розглянемо елементарну антенну систему (3D пеленгування), що складається з двох диполів, розташованих на відстані d один від одного (рис.1).

Принцип інтерферометрії полягає у вимірюванні фази сигналу, прийнятого кожною антеною, та визначенні напрямку на джерело за різницею фаз між цими сигналами. Математично фазову різницю $\Delta\varphi$ між антенами А та В можна записати як:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sin(\phi) \sin(\theta) \pmod{2\pi} \quad (4)$$

де d – відстань між антенами, λ_0 – довжина хвилі прийнятого сигналу, θ – кут місця (кут підйому), ϕ – азимутальний кут приходу хвилі.

Якщо використовуються більше ніж дві антени, формується інтерферометрична решітка, що дозволяє підвищити точність оцінки кута приходу сигналу та усунути неоднозначності, які виникають при малій базі d відносно довжини хвилі. Застосування цифрової обробки сигналів у таких системах дає змогу використовувати алгоритми високої роздільної здатності — MUSIC, ESPRIT або Capon — що забезпечують оцінку напрямків одночасно для кількох джерел випромінювання навіть у зашумленому середовищі [5].

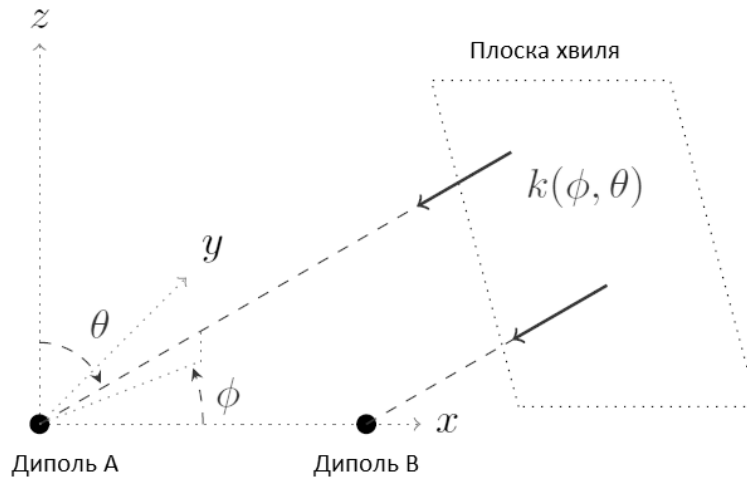


Рис.1. Принцип інтерферометрії

Перевагою інтерферометрії є її універсальність щодо топології антенної решітки. Такий метод може бути реалізований для різних геометричних конфігурацій антен — лінійних, трикутних, кільцевих, площинних або об'ємних масивів (приклади наведені на рис.2). Вибір топології визначається особливостями системи, вимогами до точності та просторової роздільної здатності.

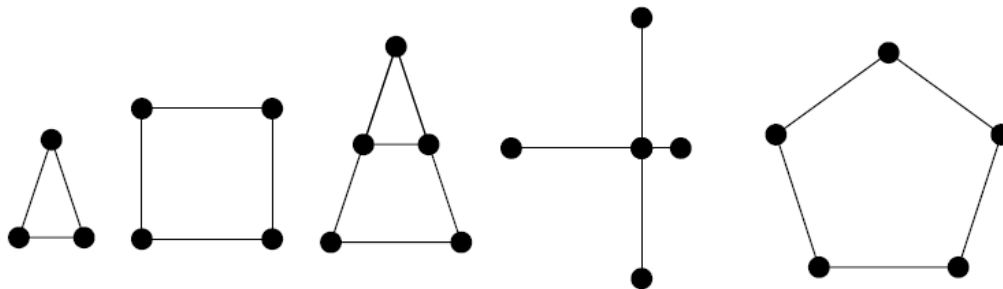


Рис.2. Приклади поширених інтерферометрів [5]

Однак для однозначного визначення напрямку на джерело випромінювання необхідно використовувати щонайменше три антени, розташовані так, щоб вони не лежали в одній площині. Це забезпечує тривимірну просторову чутливість системи. Крім того, відстань між антенними елементами повинна бути меншою за половину довжини хвилі $\lambda_0/2$, щоб уникнути появи фазових неоднозначностей (aliasing) при вимірюванні.

Таким чином, геометрія, кількість та відстань між елементами антенної решітки безпосередньо впливають на точність визначення напрямку приходу сигналу, чутливість до кутових похибок та захист від просторових неоднозначностей. Оптимальна конфігурація антенної системи дозволяє досягати високої точності пеленгування навіть за наявності шуму та багатопроменевого поширення сигналу.

Вибір параметрів моделювання

Для побудови залежності кута приходу сигналу θ від різниці фаз, використаємо спрощену формулу інтерферометра (2), (3) для двох елементів у площині (2D). Це дає коректну оцінку кута приходу в одному вимірі (θ) і є адекватною моделлю для компактних лінійних/площинних SDR-пеленгаторів. Для повного тривимірного локалізування (одразу по азимуту й висоті) слід перейти до 3D-моделі зі спеціальною геометрією елементів або багатоканальною когерентною апаратурою[6].

Для моделювання було обрано довжину хвилі $\lambda_0=0,3$ м, що відповідає робочій частоті близько 1 ГГц. Такий вибір зумовлений тим, що частота 1 ГГц не є «офіційним» каналом управління безпілотних літальних апаратів, проте лежить у межах найбільш насиченого спектра їхньої активності. Саме в цьому діапазоні (800–1800 МГц) функціонують основні канали керування, телеметрії, передачі відео та супутникової навігації (GPS, GLONASS) [7].

Таким чином, дослідження в цьому діапазоні є практично доцільним для систем охорони периметру, які використовують SDR-радіомоніторинг для виявлення несанкціонованих радіовипромінювань і безпілотників (Таблиця 1).

Таблиця 1

Основні діапазони, які реально застосовуються у БпЛА

Призначення	Типовий діапазон	Конкретні частоти	Примітка
Керування (телеметрія, RC-зв'язок)	0.4–0.9 ГГц	433 МГц, 868–915 МГц	Дальній контроль, малий рівень втрат; 868/915 МГц – стандарт LoRa, Crossfire, ExpressLRS.
Передача відео (FPV, цифрове або аналогове)	1–6 ГГц	1.2 ГГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц	1.2 ГГц — для далекої дії (низьке загасання, але громіздкі антени).
GNSS (навігація)	~1.1–1.6 ГГц	GPS L1 (1.575 ГГц), GLONASS (1.602 ГГц)	Пасивний прийом сигналів супутникової навігації.
Бортові сенсорні мережі (SDR, радар, телеметрія)	~0.9–2 ГГц	залежить від конкретної системи	Використовуються у наукових або військових системах.

Базу антен $d=0,15$ м було вибрано як половину довжини хвилі ($d=\lambda_0/2$), що є класичним інженерним компромісом: така конфігурація забезпечує однозначне визначення напрямку на джерело сигналу в межах кута $0-90^\circ$ без фазових неоднозначностей (ефекту 2π), а також дозволяє реалізувати компактну антенну систему, придатну для мобільних або стаціонарних SDR-комплексів.

Вибрані параметри $\lambda_0=0,3$ м і $d=0,15$ м забезпечують достатню просторову роздільну здатність і відповідають типовим умовам роботи систем радіомоніторингу для виявлення та пеленгування БпЛА у реальних охоронних сценаріях.

Таблиця 2

Таблиця залежності кута приходу сигналу θ від різниці фаз $\Delta\varphi$ для параметрів $\lambda_0=0,3$ м і $d=0,15$ м

$\Delta\varphi$ (рад)	$\Delta\varphi$ (°)	θ (°)	$\sin \theta$
0,00	0,00	0,00	0,00
0,2618	15,00	4.780	0,0833
0,5236	30,00	9.594	0,1666
0,7854	45,00	14.478	0,25
1,0472	60,00	19.471	0,3333
1,3090	75,00	24.624	0,4167
1,5708	90,00	30.000	0,50
2,0944	120,00	41.810	0,6666
2,3562	135,00	48.590	0,75
2,6179	150,00	56.443	0,8333
2,8798	165,00	66.444	0,9167
3,1416	180,00	90.000	1,00

Отримані розрахункові дані подані у вигляді таблиці, що відображає зміну кута приходу сигналу залежно від різниці фаз між антенами. Для наочності цієї залежності на рис.1 побудовано графік $\theta(\Delta\varphi)$, який демонструє характерну нелінійність фазового зв'язку та підтверджує теоретичну модель інтерферометричного пеленгування.

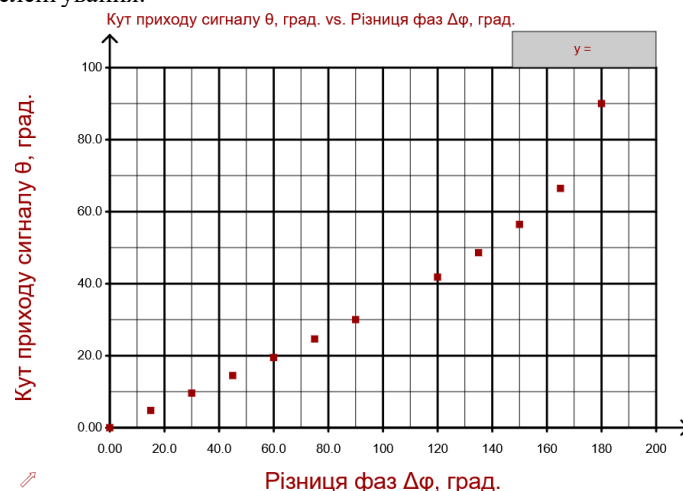


Рис.3. Графік залежності кута приходу сигналу від різниці фаз

Ділянка малої різниці фаз ($0-60^\circ$). У цьому діапазоні графік майже лінійний – невеликі зміни $\Delta\varphi$ викликають пропорційні зміни θ . Це зона високої точності пеленгування, де похибка вимірювання фази

мінімально впливає на оцінку напрямку. Для практичних систем саме цей сектор (до $\approx 30^\circ$ – 40° по θ) найточніший.

Середній діапазон (60–120°). Починає проявлятися **нелінійність** – чутливість системи зменшується. Тобто, при однаковій зміні фази $\Delta\varphi$, кут θ зростає менше. Для компенсації цього ефекту у системах SDR використовують калібрування або розширюють базу антен.

Ділянка великих фазових зсувів (120–180°). Графік різко піднімається – це зона **насичення функції $\arcsin()$** , де малі похибки вимірювання фази призводять до великих похибок у визначенні кута. Фізично це означає, що сигнал приходить під великим кутом до антенної бази, і різниця шляху майже дорівнює половині довжини хвилі ($\lambda_0/2$). Подальше збільшення $\Delta\varphi$ призведе до фазових неоднозначностей (ефект «mod 2π »).

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі розглянуто застосування інтерферометричного методу у програмно-конфігурованого радіо (SDR) для побудови пеленгувальних радіосистем охорони периметру. Показано, що інтерферометричний підхід є одним із найбільш точних та ефективних методів визначення напрямку на джерело радіовипромінювання, оскільки базується на вимірюванні різниці фаз сигналів, прийнятих просторово рознесеними антенами. На відміну від амплітудних і доплерівських методів, інтерферометрія забезпечує високу роздільну здатність, швидкодію та можливість одночасного визначення кількох напрямків за умови цифрової обробки сигналів [9].

Реалізація пеленгатора на основі SDR-технології забезпечує гнучкість і адаптивність системи: програмна обробка сигналів дозволяє змінювати робочі частоти, алгоритми фільтрації та методи аналізу без заміни апаратної частини [10]. Такий підхід значно спрощує модернізацію радіомоніторингових систем, підвищує точність вимірювань і дозволяє інтегрувати пеленгатор у складні комплексні системи охорони з елементами штучного інтелекту.

Для перевірки ефективності обраного методу було проведено моделювання залежності кута приходу сигналу θ від різниці фаз $\Delta\varphi$ при довжині хвилі $\lambda_0=0,3$ м (частота близько 1 ГГц) та базі антен $d=0,15$ м. Такі параметри відповідають умовам реальної експлуатації SDR-радіомоніторингу в діапазоні 800–1800 МГц, де працюють основні канали керування, передачі даних і навігації безпілотних літальних апаратів. Отримані результати підтверджують нелінійну залежність між фазовою різницею та кутом приходу сигналу, що відповідає теоретичній моделі інтерферометричного пеленгування [11].

Моделювання показало, що при базі $d=\lambda_0/2$ забезпечується однозначне визначення напрямку в межах 0 – 90° , а найбільша точність досягається при малих кутах приходу (до 30°), що є оптимальним для застосування у системах охорони периметру. Отже, запропонований підхід дозволяє створити високоточну, адаптивну та масштабовану SDR-систему пеленгування, придатну для виявлення джерел радіосигналів, зокрема безпілотних літальних апаратів, у зонах обмеженого доступу.

Рекомендовано впроваджувати розроблені принципи у складі комплексних систем охорони стратегічних об'єктів, доповнюючи їх автоматизованими засобами спектрального аналізу, машинного навчання для класифікації сигналів і мультиантенними SDR-комплексами для підвищення просторової точності пеленгування.

Література

1. Introduction into Theory of Direction Finding. Radiomonitoring and Radiolocation 2000/2001. Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG Editor: Gerhard Kratschmer, HW-UKD. P. 85-101.
2. Johnson, Richard&Hipp, Jackie&Sherrill, William. (2005). Radio Direction Finding. <https://doi.org/10.1002/0471654507.eme353>
3. Direction of Arrival Analysis on a Mobile Platform [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/real-time_direction_finding/Todd-Moon-Gnuradio-DOA.pdf
4. Direction Finding in GNU-Radio [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/gr_doa_gnuradio_direction_finding/Travis-Collins-gr-doa.pdf
5. 737 LF/HF/VHF/UHF/SHF Spectrum Monitoring System [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://docplayer.net/16458173-737-lf-hf-vhf-uhf-shf-spectrum-monitoring-system.html>
6. О.І.Полікаровських Моделювання характеристик ширококутової антенної системи для пеленгації БПЛА [Текст] / Бойко Ю.М., Ткачук В. П., Свістунов О. С // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022 (309). - № 3. - С. 158-167 <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-158-167>
7. О.І.Полікаровських Системи програмно-конфігурованого радіо як основа розвитку пеленгаційних радіотехнічних систем наступного покоління [Текст] / Бойко Ю.М., Ткачук В. П., Свістунов О.

C // MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, (1), 27–35.
<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-69-1-4>

8. Polikarovskiykh O. Development and modeling of the antenna system the direction finder Unmanned Aerial Vehicle / J.Boyko, V. Tkachuk, I. // Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 13(1), 26-32., (2023)DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3239>

9. Polikarovskiykh O.I.. Mobile Computing and Sustainable Informatics: monograph / J. Boiko ,O.Polikarovskiykh , V.Tkachuk, H. Yehoshyna and L. Karpova.: Springer, 2023. – 797 p. (Розділ Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems с. 89-109) ISBN 978-981-99-0835-6, <https://doi.org/10.1007/978-981-99-0835-6>

10. О.І.Полікарівських Використання програмної платформи gnu radio для реалізації пошукового алгоритму пеленгатора кореляційного інтерферометра [Текст] / Гула І.В., Полікарівських О. І. // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2023(325). - № 5. - С. 147-154 <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-147-154>

11. O. Polikarovskiykh and I. Hula, “Implementing the Search Algorithm of the Correlation Interferometer Direction Finder through the GNU Radio Software Platform”, SISIOT, vol. 1, no. 2, p. 02006 <https://doi.org/10.31861/sisiot2023.2.02006>

References

1. Introduction into Theory of Direction Finding. Radiomonitoring and Radiolacation 2000/2001. Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG Editor: Gerhard Kratschmer, HW-UKD. P. 85-101.
2. Johnson, Richard&Hipp, Jackie&Sherrill, William. (2005). Radio Direction Finding. 10.1002/0471654507.eme353.
3. Direction of Arrival Analysis on a Mobile Platform [Elektroni resurs] - Rezhym dostupu: https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/real-time_direction_finding/Todd-Moon-Gnuradio-DOA.pdf
4. Direction Finding in GNU-Radio [Elektroni resurs] - Rezhym dostupu: https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/gr_doa_gnuradio_direction_finding/Travis-Collins-gr-doa.pdf
5. 737 LF/HF/VHF/UHF/SHF Spectrum Monitoring System [Elektroni resurs] - Rezhym dostupu: <https://docplayer.net/16458173-737-lf-hf-vhf-uhf-shf-spectrum-monitoring-system.html>
6. O.I.Polikarovskiykh Modeliuvannya kharakterystyk shirokosmuhovoi antennoi systemy dla pelenhatsii BPLA [Текст] / Boiko Yu.M., Tkachuk V. P., Svistunov O. S // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. - 2022(309). - № 3. - S. 158-167 <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-158-167>
7. O.I.Polikarovskiykh Systemy prohramno-konfigurovanoho radio yak osnova rozvytku pelenhatsiinykh radiotekhnichnykh system nastupnogo pokolinnia [Текст] / Boiko Yu.M., Tkachuk V. P., Svistunov O. S // MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, (1), 27–35. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-69-1-4>
8. Polikarovskiykh O. Development and modeling of the antenna system the direction finder Unmanned Aerial Vehicle / J.Boyko, V. Tkachuk, I. // Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 13(1), 26-32., (2023)DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3239>
9. Polikarovskiykh O.I.. Mobile Computing and Sustainable Informatics: monograph / J. Boiko ,O.Polikarovskiykh , V.Tkachuk, H. Yehoshyna and L. Karpova.: Springer, 2023. – 797 p. (Rozdil Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems s. 89-109) ISBN 978-981-99-0835-6, <https://doi.org/10.1007/978-981-99-0835-6>
10. O.I.Polikarovskiykh Vykorystannya prohramnoi platformy gnu radio dla realizatsii poshukovoho alhorytmu pelenhatora koreliatsiinoho interferometra [Текст] / Hula I.V., Polikarovskiykh O. I. // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. - 2023(325). - № 5. - S. 147-154 <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-147-154>
11. O. Polikarovskiykh and I. Hula, “Implementing the Search Algorithm of the Correlation Interferometer Direction Finder through the GNU Radio Software Platform”, SISIOT, vol. 1, no. 2, p. 02006 <https://doi.org/10.31861/sisiot2023.2.02006>