

DOI: 10.18372/2310-5461.65.19932
УДК 621.396.67(045)

О. А. Щербина, д-р техн. наук, проф.
Державний університет «КАІ»
orcid.org/0000-0002-6058-2749
e-mail: shcherbina_ol@kai.edu.ua;

Ф. О. Катушонок, PhD студ.
Державний університет «КАІ»
orcid.org/0009-0008-3483-9871
e-mail: 5307190@stud.kai.edu.ua;

О. С. Задорожний, канд. техн. наук
Державний університет «КАІ»
orcid.org/0000-0002-2660-8829
e-mail: oleksandr.zadorozhnyi@npp.kai.edu.ua

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ SDR У СИСТЕМАХ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ І СТЕЖЕННЯ ЗА ДЖЕРЕЛОМ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Вступ

Точне визначення положення об'єктів у просторі останнім часом набуває ще більшого значення, охоплюючи різноманітні сфери, як цивільні (урядові, наукові та комерційні), так і військові. Положення джерела радіовипромінювання (ДРВ) може бути статичним або динамічним, одиничним або багатопозиційним, дружнім або ворожим. Визначення положення ДРВ передбачає врахування таких важливих параметрів, як кут, відстань, швидкість об'єкту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Функція виявлення та стеження за джерелом сигналу (функція пеленгації) часто є найважливішим компонентом сучасних радіосистем і комплексів виявлення, визначення дальності, моніторингу, навігації, контролю та зв'язку [1, 2]. Робочі характеристики цих систем наряду залежать від якісних характеристик пеленгаційної частини. Серед основних характеристик таких систем можна виділити робочий діапазон частот, точність пеленга та діапазон кутів для однозначних вимірювань, до яких висуваються особливо високі вимоги, особливо при використанні пеленгаторів для систем безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [3, 4]. Сучасні тенденції розширення застосування БПЛА, безекіпажних морських суден і наземних транспортних засобів [5] зумовлюють необхідність вдосконалення бортових і наземних систем визначення та стеження за кутовим положенням джерел радіовипромінювання. Основна проблема в роботі пеленгатора полягає в тому, щоб збалансувати високу точність пеленга з широким діапазоном кутів вимірювання.

Програмно-конфігуроване радіо (Software Defined Radio – SDR) це радіопристрій, в якому більшість

фізичних функцій реалізовані у програмному вигляді, а апаратні функції оперативного модифікуються за вимогами робочого стандарту зв'язку. Завдяки програмній реалізації більшості функцій обробки високочастотних сигналів і оперативному програмному управлінню, SDR забезпечує суттєве підвищення функціональних можливостей за рахунок роботи в широкій смузі частот та для різних стандартів зв'язку.

До основних функцій SDR фізичного рівня відносяться: посилення, модуляція/демодуляція, канальна селекція в приймачі, придушення побічного випромінювання в передавачі, перетворення частоти при модуляції/демодуляції на проміжній частоті. Програмно-конфігуроване радіо реалізує функції радіоприймача та радіопередавача у програмному вигляді або за допомогою програмно керованих апаратних компонентів, які не можуть бути реалізовані програмно, наприклад, підсилювач потужності або антена.

Пристрій SDR відомий своєю гнучкою конфігурацією, доступністю та швидкістю та часто використовується в різних задачах дослідження та обробки сигналів радіозв'язку, наприклад для дослідження мереж зв'язку, програми телеметрії даних і програми вимірювання кута приходу (Angle of Arrival – AoA) [6-8].

Постановка завдання

Поєднання антенних решіток (АР) з технологією SDR дає можливість реалізувати адаптивні антенні системи з цифровою обробкою сигналів, що зможуть ефективно аналізувати завадову обстановку та керувати ДС антени для покращення взаємодії з користувачами і, водночас, придушувати небажані джерела завади. Таке поєднання дає можливість оперативного розраховувати вагові

коефіцієнти, спираючись на дані про кутове положення джерел корисного сигналу та сигналів завад, що дозволяє покращувати якість зв'язку і придушувати небажані джерела завад.

Мета статті

Метою статті є обґрунтування принципу побудови антенної системи виявлення та стеження за ДРВ з використанням SDR.

Методи вимірювання кута приходу радіосигналу

Існує багато робіт, які досліджують різні методи вимірювання AoA. Ці методи охоплюють підходи на основі комбінованого амплітудно-фазового методу [9], методу на основі множинної класифікації сигналів (multiple signal classification – MUSIC) [10], методу перемикавання променів [11], що використовує просту взаємну кореляцію, методу реверсування часу для виявлення цілей під низьким кутом [12]. Ці методи зазвичай використовують складні антенні решітки та потребують значного часу обробки. Інший підхід до вимірювання AoA полягає в обчисленні різниці фаз між двома антенами. Важливо також забезпечити відокремлення сигналу цілі від будь-яких сигналів завад. Щоб досягти цього, дослідники зазвичай використовують такі методи, як аналіз незалежних компонентів (Independent Component Analysis – ICA) [13] і частотна фільтрація.

У загальному випадку виявлення і стеження за джерелом радіовипромінювання (ДРВ) реалізується за допомогою двох основних методів [14]: амплітудного та фазового (рис. 1).

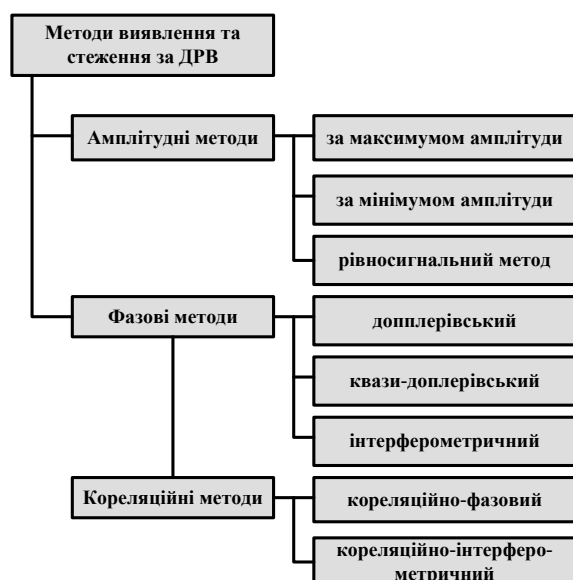


Рис. 1. Класифікація методів виявлення та стеження за ДРВ

Амплітудні методи базуються на аналізі амплітудного розподілу електромагнітного поля, створеного ДРВ у розкритті антени пеленгатора

у визначеній (азимутальній або меридіональній) площині. Амплітудна пеленгація може здійснюватися за допомогою обертання однієї антени з високим коефіцієнтом підсилення [15], перемикавання між декількома антенами з високим коефіцієнтом підсилення, електронне перемикавання антен із низьким коефіцієнтом підсилення в круговій решітці для імітації обертання вузького променю тощо.

Існує три основні амплітудні методи: по максимуму амплітуди, по мінімуму амплітуди, рівносигнальний метод.

У разі використання *методу за максимумом амплітуди* сигналу виявлення положення ДРВ відбувається за максимумом діаграми спрямованості (ДС) обертової антенної системи (рис. 2). При цьому напруга на виході антени U безпосередньо залежить від напруженості поля E в її площині та ДС антени $F(\theta, \varphi)$, де θ та φ – меридіональна та азимутальна координати

$$U = hEF(\theta, \varphi),$$

де h – діюча висота антени пеленгатора.

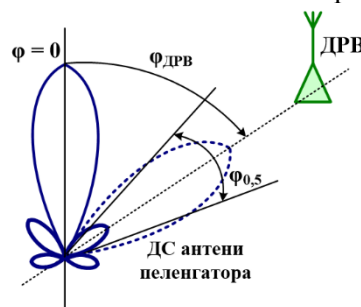


Рис. 2. Метод пеленгації по максимуму

Фіксація кутових координат ДРВ відбувається у момент, коли рівень напруги на виході радіоприймача (РПП) досягає максимального значення.

Переваги методу:

- незначний вплив шумів на точність виявлення, так як у напрямку максимуму ДС приймається максимально можливий рівень корисного сигналу;

- відносна простота реалізації, яка потребує одноканальний РПП.

Недолік методу:

- недостатня точність вимірювання через малу крутизну ДС антени в районі максимуму, що потребує використання антен з вузькою головною пелюсткою ДС; Також похибки можуть виникати через наявність бічних пелюсток в ДС.

Точність визначення місцеположення ДРВ становить приблизно

$$\Delta\varphi = 0,2\varphi_{0,5},$$

де $\varphi_{0,5}$ – ширина ДС за половинною потужністю випромінювання.

Спосіб виявлення ДРВ за мінімумом амплітуди сигналу (різницевий метод) використовується коли є можливість сформувати ДС антенної системи з чітким мінімумом прийнятого сигналу, до того ж він повинен бути єдиним. Таку ДС можна сформувати за допомогою системи з двох однакових вузькоспрямованих антен (рис. 3). Знаходження ДРВ відбувається шляхом обертання антенної системи до положення мінімального значення напруги на виході РПП.

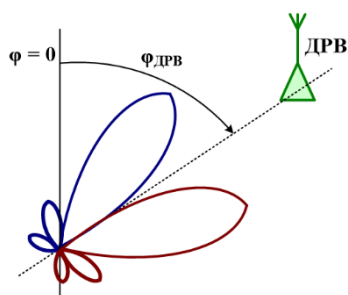


Рис. 3. Метод пеленгації по мінімуму

Перевага методу:

- більша ніж у методі по максимуму сигналу точність визначення координат ДРВ, оскільки ДС антени має більшу крутизну коло свого мінімального значення; похибка становить

$$\Delta\varphi = 0,1\varphi_{0,5}.$$

Недолік методу:

- через малий рівень різницевого сигналу на похибку виявлення можуть впливати шуми;
- дальність дії менша, ніж за попереднім методом.

Рівносигнальний метод – метод, який призначений усунути недоліки перших двох амплітудних методів. Він може бути реалізований за рахунок двох спрямованих однакових антен, ДС яких розвернуті одна відносно одної на деякий кут α , значення якого менше ширини ДС (рис. 4). Напрямок на ДРВ визначається за рівністю сигналів з двох антен.

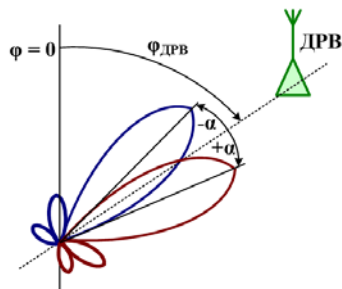


Рис. 4. Рівносигнальний метод

Перевага методу:

- більша точність і чутливість визначення координат ДРВ ніж у методі по мінімуму сигналу; похибка становить

$$\Delta\varphi = 0,05\varphi_{0,5}.$$

Фазові методи використовують аналіз зміни розподілу фаз сигналів, прийнятих елементами антенної решітки (АР) пеленгатора. Фазова пеленгація [16] використовує такі методи, як: пряме вимірювання різниці фаз між приймачами з антенами, розташованими на відстані менше половини довжини хвилі, інтерферометричне вимірювання різниці фаз між кількома просторово рознесеними приймачами та вимірювання фази прийнятих сигналів із фазовою модуляцією, спричиненою ефектом Доплера через кругове обертання антени. Фазові вимірювання в радіосистемах вимагають вторинної обробки прийнятих сигналів.

Не дивлячись на достатньо велике різноманіття назв методів, таких як доплерівський, квазидоплерівський, кореляційно-фазовий, інтерферометричний, кореляційно-інтерферометричний тощо, всі вони відносяться до фазових методів.

Фазовий спосіб виявлення ДРВ та стеження за ним базується на використанні залежності різниці фаз сигналів, які приймаються окремими елементами антенної системи, що рознесені на деяку визначену відстань d (база пеленгатора). Розглянемо фазовий метод на прикладі антенної системи з двох елементів А1 та А2 (рис. 5).

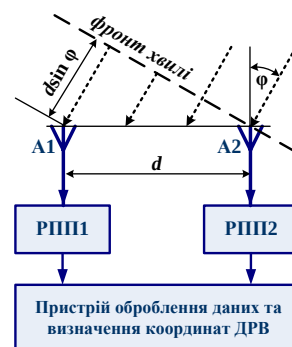


Рис. 5. Фазовий метод на прикладі двоелементної антенної системи

У загальному випадку фронт електромагнітної хвилі, що проходить під деяким кутом до базової лінії між двома антенами, досягає однієї з антен раніше. Тобто, хвилі, що надходять до антен А1 та А2 з напрямку, який визначається кутом φ , проходять різні відстані, різниця між якими складає

$$\Delta d = d \sin \varphi.$$

При цьому різниця фаз високочастотних коливань ДРВ в антенах А1 та А2 буде

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta d}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \varphi.$$

Звідси можна визначити значення кутового положення

$$\varphi = \arcsin \frac{\lambda \Delta\varphi}{2\pi d}.$$

Для визначення напрямку на ДРВ потрібно знати частоту (довжину хвилі) прийнятих сигналів і різницю фаз цих сигналів у точках прийому.

Якщо антенна система складається з двох антен, то це може призвести до неоднозначного виявлення напрямку на ДРВ, оскільки така ж сама різниця фаз на виходах антени може бути отримана від сигналу з протилежного напрямку. Для усунення цієї невизначеності можна використати другу пару антен, базова лінія яких перпендикулярна до базової лінії першої пари. Або можна використовувати екранування. У цьому випадку пеленгування можливе тільки в одному півпросторі і може виникнути необхідність у використанні поворотного пристрою.

Структура SDR приймача

На рис. 6 представлена узагальнена структурна схема сучасного SDR-приймача.

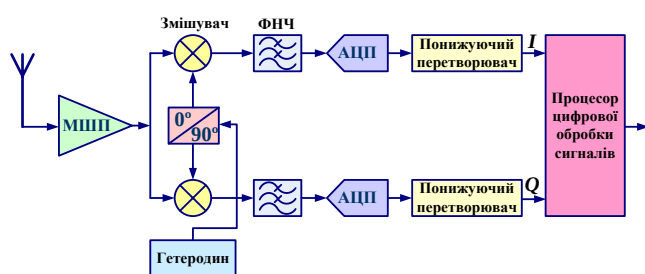


Рис. 6. Структурна схема SDR-приймача

Типову систему SDR можна розділити на ряд функціональних блоків.

Аналоговий інтерфейс (RF/IF) є єдиною частиною радіо, що складається виключно з апаратного забезпечення. Аналоговий радіочастотний сигнал, прийнятий антеною, подається на вхід малошумного підсилювача (МШП), ділиться на компоненти I та Q , шляхом змішування з сигналом гетеродина (для отримання квадратурної компоненти сигнал зміщується на 90°). Частота гетеродина підлаштовується під частоту сигналу так, щоб різниця вихідних сигналів змішувачів дорівнювала нулю без модуляції. Для модульованого сигналу вона буде дорівнювати сигналу основної смуги або вихідному модульованому сигналу. Ця архітектура отримала назву пряме перетворення або перетворення з нульовою проміжною частотою.

Основною специфікацією, необхідною для апаратної частини, є можливість змінювати несучу частоту радіосигналу від десятків МГц до кількох ГГц (наприклад, від 70 МГц до 6 ГГц). Для цього змішувач повинен бути широкосмуговим, а гетеродин має бути керованого напругою типу (VCO, Voltage Controlled Oscillator). Між антеною та змішувачем можна вставити смуговий фільтр,

але для максимальної гнучкості він повинен мати програмовану смугу та центральну частоту.

На вході в ланцюг прийому після змішувача аналоговий сигнал в базовій смузі проходить через фільтр низьких частот (ФНЧ), який зазвичай називають фільтром згладжування, з частотою зрізу, яка обмежує діапазон. Відфільтрований сигнал потім сканується аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) і передається до основної системи обробки пропускну здатності. Фільтр згладжування є аналоговим фільтром.

Аналого-цифрові перетворення (АЦП) – це змішаний блок, що працює як з цифровими, так і з аналоговими сигналами. Цей блок діє як інтерфейс між апаратною частиною та частиною, визначеною за допомогою програмного забезпечення. Щоб краще зрозуміти роботу цього блоку та його складових частин, необхідно розрізнити ланцюг передачі та ланцюг прийому базового сигналу. Так як для цілей нашого дослідження немає потреби використовувати функцію передачі сигналів, то розберемо ланцюг прийому сигналу. Оцифровування сигналу означає поділ його на кілька збалансованих за часом вибірок і асоціювання кожної вибірки з числовим значенням. Ці операції називаються «вибіркою» та «квантуванням». Далі вибирається відповідний часовий інтервал, який називається періодом дискретизації, і відповідну кількість бітів квантувача, що дають мінімальну різницю амплітуд, яку можна виявити між однією вибіркою та іншою.

Щоб задовольнити потребу у високопродуктивному апаратному забезпеченні, яке є максимально економічним, після АЦП використовується система перетворення швидкості, яка називається дециматор (цифровий понижуючий перетворювач). Дециматор служить для зниження частоти, з якою вибірки подаються процесору, таким чином уникаючи збільшення обчислювальних витрат. Зазвичай дециматор складається з ФНЧ, який працює на найвищій швидкості з частотою зрізу, що дорівнює половині найнижчої частоти. Вихід фільтра – це схема, яка повторно дискретизує сигнал із частотою вибірки.

Останній, але не менш важливий блок системи SDR – це блок обробки у базовій смузі (Baseband Processing – BBP), у якому генерується чи обробляється цифровий сигнал у базовій смузі. Як правило, враховуючи обсяг даних, якими має керувати пристрій, та враховуючи вимоги перепрограмування, блок реалізується за допомогою технології FPGA (Field-Programmable Gate Array), яка дозволяє реалізувати співпроцесори, здатні виконувати паралельні операції. Великі обсяги даних можуть оброблятися дуже швидко, і таким чином може бути дозволена нижча тактова частота, ніж

у системі на основі мікропроцесора, яка виконує послідовні операції.

Перевага SDR полягає у відносній простоті апаратної частини. Сигнальний процесор виконує більшу частину функцій, які раніше реалізовувались в аналогових схемах. Програмна реалізація дозволяє усувати несправності, змінювати і доповнювати функціонал пристрою і покращувати його характеристики з мінімальними витратами. Крім того SDR дозволяє швидко додавати нові типи модуляції, протоколи передачі тощо. У разі апаратної реалізації це вимагало б виготовлення нової схеми. До недоліків SDR можна віднести складність програмного забезпечення.

Для досліджень в цій роботі був використаний SDR нового покоління BladeRF2.0 micro xA4 [17] з частотним діапазоном від 47 МГц до 6 ГГц, частотою дискретизації 61,44 МГц (з можливістю збільшення до 122,88 МГц) та потоковою передачею 2×2 MIMO.

Дослідження антенних систем виявлення та стеження

Дослідження доцільності використання *амплітудного методу виявлення і стеження за БПЛА* було проведене з використанням методу пеленгації по максимуму за допомогою механічного обертання антени. Спрощена структурна схема такої реалізації представлена на рис. 7.



Рис. 7. Принцип побудови пеленгатора за максимумом сигналу з механічним обертанням антени

Як антени виявлення і стеження було вибрано два варіанти спрямованих антен: антену Уда-Ягі (рис. 8) з лінійною поляризацією та патч-АР колової поляризації (рис. 9). Можна використовувати і інші типи спрямованих антен, або антенних решіток [18, 19], що буде залежати від особливостей експлуатаційних умов. Для дослідження обрано частотний діапазон 5,8 ГГц.

Як було відмічено вище, точність визначення місцеположення ДРВ при використанні методу по максимуму сигналу становить приблизно $\Delta\varphi = 0,2\varphi_{0,5}$, де $\varphi_{0,5}$ – ширина ДС за половинною потужністю випромінювання в азимутальній (або меридіональній) площині.

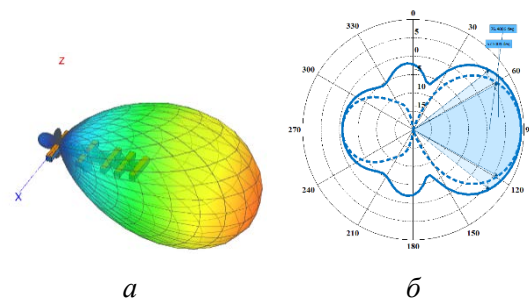


Рис. 8. Діаграма спрямованості антени Уда-Ягі: а – 3D; б – в площині E (пунктирна лінія) та в площині H (суцільна лінія)

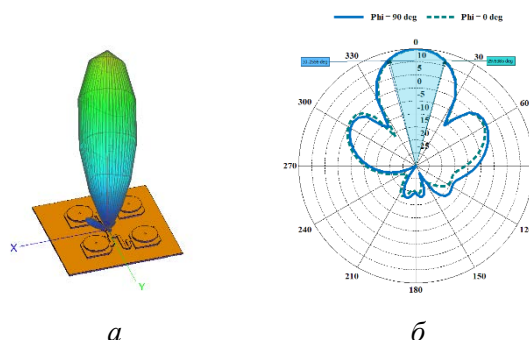


Рис. 9. Діаграма спрямованості патч-АР: а – 3D; б – в площині $\varphi = 0$ град (пунктирна лінія) та в площині $\varphi = 90$ град (суцільна лінія)

Тобто, теоретично можна розрахувати можливу помилку визначення кутів місцезнаходження ДРВ за умови використання антени Уда-Ягі або патч-АР:

– для антени Уда-Ягі при її встановленні з горизонтальною поляризацією:

в азимутальній площині

$$\Delta\varphi = 0,2\varphi_{0,5}^E = 0,2 \cdot 57,5 / 2 \approx 6 \text{ град.};$$

у меридіональній площині

$$\Delta\theta = 0,2\theta_{0,5}^H = 0,2 \cdot 76,5 / 2 \approx 8 \text{ град.};$$

– для 4-елементної патч-АР

в азимутальній та меридіональній площинах

$$\Delta\varphi = 0,2\varphi_{0,5} = 0,2 \cdot 30,0 / 2 \approx 3 \text{ град.}$$

Але, незважаючи на те, що використання АР теоретично дає більшу точність визначення місцеположення ДРВ, в її ДС присутні бічні пелюстки (у напрямках $\pm 56,5$ град) відносно високого рівня (до рівня -13,6 дБ), що може спричинити неоднозначність у виявленні джерела сигналу.

Окремо серед фазових методів *виявлення і стеження* можна виділити кореляційний метод пеленгації. Кореляційні пеленгатори [20] поєднують переваги амплітудних і фазових пеленгаторів шляхом визначення напрямку джерел радіовипромінювання за допомогою статистичної обробки комплексних амплітуд сигналів. Ці системи, у складі яких є багатoelementні АР, можуть розділяти сигнали та завади в об'єднаних каналах

і ізолювати сигнали від фону когерентних перешкод. Вони використовують такі алгоритми, як MUSIC, багаторівнева оцінка максимальної правдоподібності (Multilevel Maximum Likelihood Estimation – MLE) і пеленгація з високою роздільною здатністю (Super-Resolution Direction Finding – SR-DF). Ці системи пропонують покращену продуктивність, але вимагають значної попередньої інформації та є складними та дорогими у реалізації через необхідність когерентної обробки сигналів.

Найпростіший кореляційний пристрій для виявлення і стеження за ДРВ складається з рознесених на певну базову відстань d антен A1 та A2, двоканального РПП з спільним гетеродином, лінії затримки з керуванням, корелятора та пристрою оброблення даних і визначення пеленгу (рис. 10).

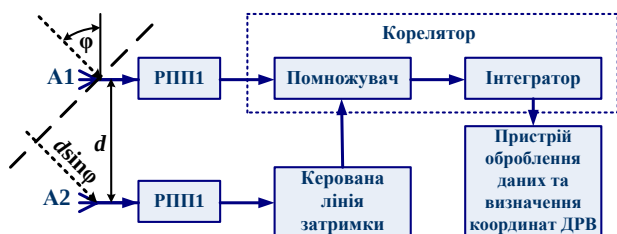


Рис. 10. Структурна схема кореляційного пеленгатора

Сигнали з двох каналів РПП поступають на корелятор: один безпосередньо, а інший через лінію затримки. Визначення положення ДРВ проводиться за максимумом напруги на виході корелятора, який досягається коли взаємна кореляція між вихідними напругами двох каналів РПП максимальна. Наприклад, це відбувається у випадку, коли базова лінія антенної системи перпендикулярна до напрямку на ДРВ, який пеленгується, і сигнали від нього приходять одночасно на дві антени A1 та A2.

У випадку коли базова лінія антенної системи не є перпендикулярною до напрямку на ДРВ, то вихідний сигнал корелятора може бути максимальним лише тоді, коли різниця часу Δt поширення сигналів від ДРВ до обох антен компенсується часом затримки в керованій лінії. Цю різницю часу можна визначити за максимальним рівнем напруги на виході корелятора шляхом регулювання часу лінії затримки і обчислити кутовий напрямок на ДРВ:

$$\cos \varphi = \frac{c \Delta t}{d},$$

де c – швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі.

Підвищення чутливості і точності виявлення ДРВ можна досягнути шляхом збільшення базової відстані d .

Пристрої, побудовані за кореляційним методом мають ряд суттєвих переваг перед іншими методами:

- можливість якісного пеленгування широко-смугових сигналів із складними видами модуляції;
- можливість оброблення та розрізнення одночасно двох або більше сигналів.

Як було зазначено вище, для реалізації фазового методу визначення положення ДРВ необхідно використовувати як мінімум дві антени двоканального РПП (SDR). Рекомендовано використовувати відносно прості антени з чітко визначеним фазовим центром. Для дослідження було вибрано півхвильові дипольні антени (рис. 11), які для виключення неоднозначності виявлення напрямку на ДРВ розміщені над екраном. Частота ДРВ – 5,8 ГГц.

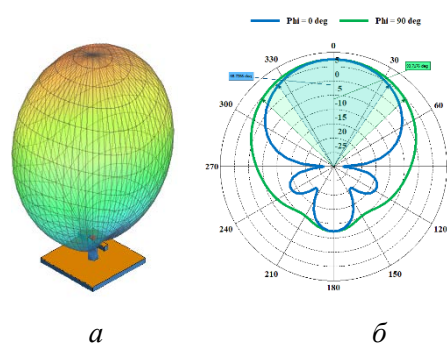


Рис. 11. Діаграма спрямованості півхвильового диполя: а – 3D; б – в полярній системі координат

Для вимірювання азимутального кута напрямку ДРВ диполі розміщуються вздовж горизонтальної осі, для вимірювання меридіонального кута – вздовж вертикальної осі.

Експериментальний зразок поєднання системи антен з SDR приймачем, що реалізує функцію виявлення та стеження з використанням фазового методу представлена на рис. 12.



Рис. 12. Система антен з SDR приймачем

На рис. 13, показано приклад інтерфейсу що показує результат пеленгу ДРВ в азимутальній та меридіональній площині.

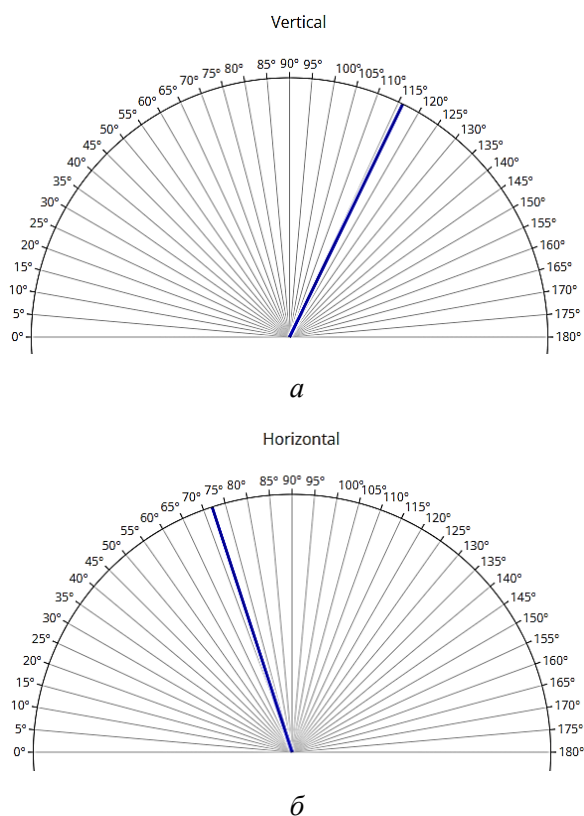


Рис. 13. Інтерфейс системи антен з SDR приймачем:
а – пеленг в меридіональній площині,
б – в азимутальній

В результаті дослідження було виявлено, що пеленг відбувається з точністю $\pm 1-2$ градуси.

Висновки

За результатами аналізу відомих методів виявлення та стеження за ДРВ, для подальших досліджень було обрано фазовий метод пеленгації. Було проаналізовано переваги і недоліки амплітудного і фазового методів. Амплітудний метод пеленгації базується на аналізі розподілу напруженості електромагнітного поля. Цей метод має перевагу у вигляді недостатньої точності, що спричинений сильною залежністю від крутизни діаграми спрямованості антени в районі максимуму і потребує використовувати антену з вузькою головною пелюсткою. Також, до недоліків амплітудного методу можна віднести занижку швидкодії, спричинену необхідністю пеленгації всього азимутального і меридіонального сектору з рознесенням у часі.

Фазовий метод базується на аналізі різниці фаз між сигналами, прийнятими різними елементами антенної решітки. Цей метод забезпечує більшу точність у порівнянні з амплітудним методом і

суттєво вищу швидкодію за рахунок миттєвого розрахунку різниці фаз. Однак, фазовий метод можливо реалізувати за допомогою більш складного і дорогого обладнання, так як він вимагає мінімум два когерентних приймальних канали SDR приймача, а також більш складного комплексного алгоритму обробки сигналів.

І перший і другий методи пеленгації показали гарні результати при дослідженні, але для наших подальших досліджень, які будуть спрямовані на побудову адаптивної системи, за точністю та швидкодією було обрано фазовий кореляційний метод виявлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhyla S., Tserne E., Volkov Y., Shevchuk S., Gribsky O., Vlasenko D., Kosharskyi V., Kovalchuk D. Statistical Synthesis and Analysis of Functionally Deterministic Signal Processing Techniques for Multi-Antenna Direction Finder Operation. *Computation*, 2024, Vol. 12, No. 9, p. 170. DOI:10.3390/computation12090170.
2. Martian A., Paleacu C., Marcu I.M., Vlădeanu C. Direction-Finding for Unmanned Aerial Vehicles Using Radio Frequency Methods. *Measurement*, 2024, Vol. 235, p. 114883. DOI:10.1016/j.measurement.2024.114883.
3. Rutkowski A., Kawalec A. Some of Problems of Direction Finding of Ground-Based Radars Using Monopulse Location System Installed on Unmanned Aerial Vehicle. *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 18, p. 5186. DOI:10.3390/s20185186.
4. Cook H. A., Kahn K. M. T. E. and Balyan V. Radio Direction-Finding Techniques for an Unmanned Aerial Vehicle. In: *Sharma D. K., Balas V. E., Son L. H., Sharma R., Cengiz K. (eds). Micro-Electronics and Telecommunication Engineering, Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, Singapore, 2020, Vol. 106, pp. 1–10. DOI:10.1007/978-981-15-2329-8_1.
5. Bae I, Hong J. Survey on the Developments of Unmanned Marine Vehicles: Intelligence and Cooperation. *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 10, p. 4643. DOI:10.3390/s23104643.
6. Hussein Z., Francois S., Oumaya B. and Thierry, V. SYLOIN: Measuring Angle of Arrival of LoRa Signals Using Software Defined Radio. In: *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Lloret de Mar, Spain, 2021, pp. 1–8. DOI:10.1109/IPIN51156.2021.9662518.
7. Dai Z., He Y., Tran V., Trigoni N. and Markham A. DeepAoANet: Learning Angle of Arrival from Software Defined Radios with Deep Neural Networks. *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, pp. 3164–3176. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3140146.
8. Tuğrel H. B., Alakoca H., Kurt G. K. and Ayyıldız C. Angle of Arrival (AoA) Estimation by Using Software Defined Radios. In: *24th Signal Processing*

- and Communication Application Conference (SIU), Zonguldak, Turkey, 2016, pp. 1429–1432, DOI:10.1109/SIU.2016.7496018.
9. Zheng Y., Tseng S.-M. and Yu K.-B. Closed-form Four-channel Monopulse Two-target Resolution. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, Vol. 39, No. 3, pp. 1083–1089. DOI:10.1109/TAES.2003.1238760.
 10. Wong K. T. and Zoltowski M. D. Self-initiating MUSIC-based Direction Finding and Polarization Estimation in Spatio-polarizational BeamSpace. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, Vol. 48, No. 8, pp. 1235–1245. DOI:10.1109/8.884492.
 11. Badawy A., Khattab T., Trinchero D., Elfouly T. M. and Mohamed A. A Simple Cross Correlation Switched Beam System (XSBS) for Angle of Arrival Estimation. *IEEE Access*, 2017, Vol. 5, pp. 3340–3352. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2669202.
 12. Zeng X., Yang M., Chen B. and Jin Y. Estimation of Direction of Arrival by Time Reversal for Low-Angle Targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, Vol. 54, No. 6, pp. 2675–2694. DOI:10.1109/TAES.2018.2828200.
 13. Li J. and Fan M. Jamming Suppression in Downlink NOMA Using Independent Component Analysis. In: *IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Xi'an, China, 2019, pp. 164–168. DOI:10.1109/ICCT46805.2019.8947299.
 14. Ільницький Л. Я., Сібрук Л. В., Слободянюк П. В., Благодарний В. Г. Антени телекомунікаційних та моніторингових систем / за ред. Л. Я. Ільницького. Київ: Видавництво УДЦР, 2012. 240 с.
 15. Yan E. et al. Improving Accuracy of an Amplitude Comparison-Based Direction-Finding System by Neural Network Optimization. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 169688–169700. DOI:10.1109/ACCESS.2020.3024031.
 16. Bakhvalov V., Zhyrov G., Khrashchevsky R., Romanenko E. and Druzhynin V. Phase Direction Finding Radio Engineering System. In: *IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, 2021, pp. 200–203. DOI:10.1109/APUAVD53804.2021.9615434.
 17. BladeRF 2.0 micro xA4 SDR трансівер 47 МГц-6 ГГц 49 КЛІЕ ПЛІС URL: https://selteq.com.ua/bladerf-2-0/?srsltid=AfmBOornKw8jRcoTQRsNHyo06gLIQOFnbLUW3QZ_ZB9tjhAVteLjNDzf (дата звернення 25.02.2025)
 18. Shcherbyna O., Zadorozhnyi R. The Log-Periodic Dipole Array Antenna for Monitoring. In: *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 583–586. DOI:10.1109/TCSET.2018.8336270.
 19. Shcherbyna O., Zadorozhnyi O., Stetsyshin O. Passive Antenna Arrays in UAV Communication Systems. *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*, 2024, Vol. 16, No. 4, pp. 31–51. DOI:10.5815/ijcnis.2024.04.03.
 20. Polikarovskiykh O. and Hula I. Implementing the Search Algorithm of the Correlation Interferometer Direction Finder through the GNU Radio Software Platform. *SISIOT*, 2023, Vol. 1, No. 2, p. 02006, DOI:10.31861/sisiot2023.2.02006.

Щербина О. А., Катушонок Ф. О., Задорожний О. С.

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ SDR У СИСТЕМАХ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ І СТЕЖЕННЯ ЗА ДЖЕРЕЛОМ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Точне визначення положення об'єктів у просторі останнім часом набуває ще більшого значення, охоплюючи різноманітні сфери, як цивільні, так і військові. Положення джерела радіовипромінювання (ДРВ) може бути статичним або динамічним, одиничним або багатопозиційним, дружнім або ворожим. Функція виявлення та стеження за джерелом радіосигналу (функція пеленгації) часто є найважливішим компонентом сучасних радіосистем і комплексів виявлення, визначення дальності, моніторингу, навігації, контролю та зв'язку. Робочі характеристики цих систем напругу залежать від якісних характеристик пеленгаційної частини. Серед основних характеристик таких систем можна виділити робочий діапазон частот, точність пеленга та діапазон кутів для однозначних вимірювань, до яких висуваються особливо високі вимоги, особливо при використанні пеленгаторів для систем безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Програмно-конфігуроване радіо (SDR) це радіопристрій, в якому більшість фізичних функцій реалізовані у програмному вигляді, а апаратні функції оперативно модифікуються за вимогами робочого стандарту зв'язку. Завдяки програмній реалізації більшості функцій обробки високочастотних сигналів і оперативному програмному управлінні, SDR забезпечує суттєве підвищення функціональних можливостей за рахунок роботи в широкій смузі частот та для різних стандартів зв'язку. Пристрій SDR відомий своєю гнучкою конфігурацією, доступністю та швидкістю та часто використовується в різних задачах дослідження та обробки сигналів радіозв'язку, наприклад для дослідження мереж зв'язку, програми телеметрії даних і програми вимірювання кута приходу (AoA). Поєднання антенних решіток з технологією SDR дає можливість реалізувати адаптивні антенні системи з цифровою обробкою сигналів, що зможуть ефективно аналізувати завадову обстановку та керувати ДС антени для покращення взаємодії з користувачами

і, водночас, придушувати небажані джерела завад. Таке поєднання дає можливість оперативно розраховувати вагові коефіцієнти, спираючись на дані про кутове положення джерел корисного сигналу та сигналів завад, що дозволяє покращувати якість зв'язку і придушувати небажані джерела завад.

Ключові слова: джерело радіовипромінювання; амплітудний та фазовий методи пеленгації; програмно-конфігуроване радіо; антенна система; діаграма спрямованості.

Shcherbyna O., Katushonok F., Zadorozhnyi O.

APPLICATION OF SOFTWARE DEFINED RADIO FOR RADIO EMISSION SOURCE DIRECTION FINDING AND TRACKING

Recently, accurate positioning of objects in space has gained significant importance, encompassing various fields, both civil and military. The position of a radio emission source (RES) can be static or dynamic, single or multi-position, friendly or hostile. The function of detecting and tracking a radio signal source (direction finding function) is often the most critical component of modern radio systems and complexes for detection, ranging, monitoring, navigation, control, and communication. The performance of these systems directly depends on the quality characteristics of the direction-finding part. Among the main characteristics of such systems are the operating frequency range, direction-finding accuracy, and the range of angles for unambiguous measurements, which require particularly high standards, especially when applying direction finding for unmanned aerial vehicle (UAV) systems. Software-defined radio (SDR) is a radio device in which most physical functions are implemented in software, and hardware functions are quickly modified according to the requirements of the communication standard. Due to the software implementation of most high-frequency signal processing functions and flexible software control, SDR provides significant enhancement of functional capabilities by operating in a wide frequency range and for various communication standards. The SDR device is known for its flexible configuration, accessibility, and speed, and is often used for various tasks in research and signal processing of radio communication, for example, communication network research, data telemetry programs, and angle of arrival (AoA) measurement programs. Combining antenna arrays with SDR technology allows for the implementation of adaptive antenna systems with digital signal processing that can effectively analyze the interference environment and manage radiation pattern of an antenna array to improve user interaction while simultaneously suppressing unwanted interference sources. This combination enables the rapid calculation of weighting coefficients based on data about the angular position of the sources of useful signals and interference signals, thereby improving communication quality and suppressing unwanted interference sources.

Keywords: radio emission source; amplitude and phase direction-finding methods; software defined radio; antenna system; radiation pattern.

Стаття надійшла до редакції 02.03.2025 р.
Прийнято до друку 16.04.2025 р.