

УДК 621.391

д-р техн. наук Сайко В. Г. ORCID: 0000-0002-3059-6787 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

Романов Д. О. ORCID: 0009-0008-5522-7591 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

канд. техн. наук, професор Радзівілов Г. Д. ORCID: 0000-0002-6047-1897 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

канд. техн. наук Комаров В. О. ORCID: 0000-0002-4929-4527 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

д-р філософії Фомін М. М. ORCID: 0000-0002-6864-4238 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ МАЛОВИСОТНОГО ОБ'ЄКТА ЗА УМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ДЕКІЛЬКОХ ПРОМЕНІВ РАДІОСИГНАЛІВ

Нині у великих містах спостерігається стійка тенденція до збільшення просторової щільності телекомунікаційних систем. Насиченість радіоспектра аналоговими та цифровими системами, що використовуються для вирішення завдань радіозв'язку та телебачення, дозволяє на їх основі удосконалювати технології напівактивного радіолокаційного виявлення та визначення координат маловисотного об'єкта.

Здійснення радіолокаційного спостереження з використанням передавачів нерадіолокаційного призначення часто називають напівактивною радіолокацією з використанням сторонніх або паразитних джерел випромінювання.

Перевагами таких систем є мінімізація витрат на розгортання, незначні експлуатаційні енерговитрати, низька ймовірність встановлення завад, скритність факту роботи, екологічність та відсутність вимог до виділення радіочастотного ресурсу. Відносно великі висоти підняття антен зв'язкових і телевізійних передавачів за наявної випромінюваної потужності створюють сприятливі умови виявлення маловисотних об'єктів.

Цифрові сигнали сучасних телекомунікаційних систем мають ширину спектра, що забезпечує прийнятну роздільну здатність та точність вимірювання сумарної дальності та кутових координат [20; 21]. Загалом системи такого типу являють собою багатопозиційну систему, що складається з одного або декількох джерел випромінювання та однієї або кількох приймальних позицій, рознесених у просторі [22; 23].

У роботі наведено загальну характеристику запропонованого методу визначення координат повітряного об'єкта на малій висоті за умов розповсюдження декількох променів радіосигналів.

Визначено метод і його технічне рішення щодо здатності визначати координати несанкціонованого маловисотного об'єкта за умов існування декількох променів розповсюдження радіосигналу та представлено алгоритм його функціонування, необхідний для технічної реалізації запропонованого методу.

У роботі розглянуто варіанти визначення координат повітряних об'єктів при різному складі первинних вимірювань координат і кількості приймальних пунктів.

Здійснено оцінку точності визначення місця розташування об'єкта для багатопозиційних радіосистем такого типу за умов існування декількох променів розповсюдження радіосигналу в розробленій моделі з врахуванням кількості сигналів, що приймаються, та помилок їх вимірювання.

Ключові слова: приймальний пункт, визначення координат, станція радіолокації, маловисотний об'єкт, супровід до виявлення, багатопозиційні радіосистеми, терагерцовий діапазон.

V. Saiko, D. Romanov, G. Radzivilov, V. Komarov, M. Fomin. Method of determining the coordinates of a low-altitude object under the conditions of using several radio signals

Currently, in large cities, there is a steady tendency to increase the spatial density of telecommunication systems. The saturation of the radio spectrum with analog and digital systems used to solve the problems of radio communication and television allows to improve the technologies of semi-active radar detection and determination of the coordinates of a low-altitude object on their basis.

Conducting radar surveillance using non-radar radar transmitters is often called semi-active radar using extraneous or parasitic radiation sources. The advantages of such systems are the minimization of deployment costs, low operating energy costs, low probability of malfunctioning, stealth of the fact of operation, environmental friendliness, and the absence of requirements for the allocation of radio frequency resources. Relatively high heights of antennas of communications and television transmitters with the existing radiated power create favorable conditions for detecting low-altitude objects. Digital signals of modern telecommunication systems have a spectrum width that provides acceptable resolution and accuracy of measuring the total distance and angular coordinates [20; 21]. In the general case, systems of this type are a multi-position system consisting of one or more radiation sources and one or more receiving positions spread in space [22; 23].

The paper gives a general description of the proposed method of determining the coordinates of an aerial object at low altitude under the conditions of propagation of several beams of radio signals. The method and its technical

solution capable of determining the coordinates of an unauthorized low-altitude object under the conditions of the existence of several rays of radio signal propagation are defined, and the algorithm of its operation necessary for the technical implementation of the proposed method is presented.

The paper considers options for determining the coordinates of aerial objects with different composition of primary coordinate measurements and the number of receiving points. The accuracy of determining the location of the object for multi-position radio systems of this type was evaluated under the conditions of the existence of several beams of radio signal propagation in the developed model, taking into account the number of received signals and their measurement errors.

Keywords: *reception point, determination of coordinates, radar station, low-altitude object, tracking to detection, multi-position radio systems, terahertz range.*

Постановка завдання у загальному вигляді

Особливості маловисотних об'єктів (МВО), що розглядаються як об'єкти радіолокаційного спостереження, до яких можна віднести екстремально низькі значення ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) порядку $0,01 \dots 0,001 \text{ м}^2$, малі висоти та швидкості польоту до 50 м/с, викликають необхідність коригування традиційних підходів до вибору параметрів, а також алгоритмів функціонування пристроїв первинної та вторинної обробки радіолокаційної інформації.

Автори вважають, що необхідно застосувати сучасні наукові розробки, в яких застосовують додаткові радіосигнали від побутових передавачів FM-діапазону і DAB – радіо, цифрового телебачення (DVB-T, DVB-T2) та сигналів базових станцій (БС) стільникового зв'язку, корисних для виявлення та фіксації координат МВО [1–5]. Наразі такі відомі компанії, як Lockheed Martin (США), Thales (Франція), Leonardo (Італія), ERA (Чеська Республіка) та ін., проводять ефективні спроби створення спеціальних радіолокаційних комплексів, які одночасно використовують декілька додаткових передавачів різних діапазонів частот. Автори вважають, що утворення та використання низьковисотного радіолокаційного простору поширить можливості штатних засобів радіоконтролю та суттєво покращить точність, надійність та достовірність радіолокаційного моніторингу повітряного простору на малій висоті [3; 4].

Важливою умовою реалізації ефективної обробки радіолокаційної інформації в системах подібного типу є визначення координати на МВО за умови існування та розповсюдження декількох променів радіосигналів.

Аналіз публікацій за темою досліджень

У роботі [1] описана експериментальна багатопозиційна радіолокаційна система, яка виявляє та відстежує цілі на дальностях більше 150 км від приймача, використовуючи ехосигнали радіопередавача FM.

У роботі [4] обґрунтовано використання телевізійного передавача в багатопозиційній радіолокаційній системі, що дозволяє виявляти МВО в діапазоні до 260 км, оцінювати їхні декартові координати з використанням розширеного фільтра Калмана.

У роботі [5] представлено дослідження та дані щодо використання радіолокаційних систем стандарту LTE, здатних бути корисними для виявлення рухомих БПЛА.

Варто зазначити, що перелічені роботи, по суті, є розвитком досліджень, проведених з урахуванням специфіки розвитку радіолокаційної техніки та сучасних вимог, що висуваються до радіотехнічних систем.

Відомий метод зменшення помилок багатопроменевості при визначенні координати джерела випромінювання за допомогою далекомірних вимірювань полягає в тому, що координати джерела визначають за допомогою алгоритму зважених залишків координатних оцінок, отриманих на основі вимірювань від використання даних від різних комбінацій приймальних станцій [6]. Недоліком цього методу є те, що для оцінки координати джерела випромінювання потрібен значний час, оскільки необхідно накопичувати й зважувати

проміжні оцінки протягом певного періоду, що робить його непридатним для визначення координат рухомих джерел випромінювання.

Існує також метод зменшення багатопроменевих помилок при визначенні координати джерела випромінювання різницево-далекомірним способом, де обробка даних здійснюється на основі різницевих вимірювань після призначення ваг для приймальних станцій, які є ймовірними джерелами віддзеркалених сигналів [7]. До недоліків цього підходу належать:

залежність достовірності визначення ваги від вибору проміжної оцінки координат для заданого набору;

ризик помилкового вибору проміжної оцінки (наприклад, завдяки усередненню оцінок у межах певної комбінації або завдяки усередненню по всіх можливих комбінаціях), що може призвести до зміщення ваг;

можливість помилкового призначення ваги в ситуаціях, коли є більше одного приймального пункту (ПП) з віддзеркаленими сигналами, що може призвести до значної помилки у визначенні координати.

В роботі [8] представлено відомий спосіб визначення координат повітряного об'єкта різницево-далекомірним методом в умовах декількох променів розповсюдження радіосигналу, який полягає в тому, що:

координати об'єкта знаходять шляхом виявлення дії декількох радіопроменів;

здійснюється виключення з обробки частини сигналів згідно з різницею часу приходу сигналів (TDOA – *Time Difference of Arrival*), що мають найбільший розкид багатопроменевої затримки часу приходу сигналу (TOA – *Time of Arrival*);

враховуються показники рівня прийнятого сигналу (RSSI – *Received Signal Strength Indication*);

враховуються співвідношення сигнал/шум (SNR), коли коефіцієнт виявляється нижче за певний поріг.

До недоліків відомого способу визначення координати повітряного об'єкта різницево-далекомірним методом в умовах існування декількох променів розповсюдження сигналу є наступні особливості:

тривалий час оцінювання координат, викликаний необхідністю прийому та вимірювання часу приходу послідовності сигналів в невизначеному інтервалі часового періоду;

відсутність можливості застосування вищевказаного метода для визначення місцезнаходження рухомого повітряного об'єкта.

Тому авторами було обрано найбільш близький метод і технічне рішення, що за своєю суттю та вирішуваною задачею є найближчим аналогом (прототипом), це спосіб визначення координати МВО в умовах існування декількох променів розповсюдження сигналів/у.

Ідея запропонованого методу полягає в наступному:

від кожного з ПП, координати яких відомі, приймають віддзеркалений від МВО радіосигнал;

надалі вимірюють час приходу радіосигналу;

формують набір проміжних оцінок координат МВО різницево-далекомірним методом для кожної можливої комбінації з трьох або більше ПП;

на основі проміжних оцінок формують підсумкову оцінку координат МВО;

остаточне визначення місцезнаходження МВО здійснюють на основі підсумкової оцінки координат.

Цей метод має деякі вади, наприклад, те, що при пошуку сигналів не враховується взаємний вплив компонент декількох променів радіосигналу, що підвищує ймовірність застосування хибних радіопромінів. Крім того, метод не оптимізує кількість променів під час використання терагерцового діапазону хвиль, що збільшує вимоги до апаратури без поліпшення точності визначення координат. Також для досягнення заданого порога

використовують емпіричну залежність дисперсії розрахунків координат від співвідношення сигнал/шум, що потребує великої кількості попередніх вимірювань і значного часу для реалізації розрахунків.

Постановка завдання

Метою цієї статті є розробка інноваційного способу та технічного рішення визначення координат МВО за умов існування декількох променів розповсюдження радіосигналу, достатніх для покращення достовірності розрахунків відстані щодо однопозиційних радіолокаційних ПП, а також забезпечення можливості прийому радіосигналів невеликого рівня у віддзеркаленому багатопроменовому радіопросторі.

Виклад основного матеріалу

1. Загальна характеристика розробленого методу визначення координати МВО за умов існування декількох променів розповсюдження сигналу.

В основу розробленого методу визначення координати МВО за умови існування декількох додаткових променів радіосигналу покладено завдання використання деяких технологічних операцій, які передбачають наступне:

- оперативне розгортання мережі ПП на базі приймально-передавальних цифрових радіорелейних систем (ЦРС) терагерцового діапазону;
- інтегрування ПП ЦРС в діючу мережу БС мобільного зв'язку;
- проведення постійного сканування зон обслуговування БС мобільного зв'язку системами сканування, які побудовані на основі ЦРС терагерцового діапазону;
- формування тимчасового кластеру збору даних вимірювань із семи груп ПП для передачі даних сканування до пункту обробки вимірювань (ПОВ) цього кластеру;
- періодичне визначення на приймальних пристроях усіх груп ПП числа і часових затримок різних компонент віддзеркалених променів радіосигналу;
- забезпечення підвищення ефективності мережі ПП на базі приймально-передавальних ЦРС терагерцового діапазону;
- використання спільних часових, спектральних ресурсів й апаратних компонентів, підвищення точності вимірювань дальності щодо однопозиційних радіолокаційних систем;
- можливості прийому променів низького рівня у віддзеркаленому багатопроменовому сигналі.

Ключовою відмінністю технічного рішення (що заявляється) від традиційних сучасних рішень є те, що для забезпечення визначення координати МВО за умов існування декількох променів розповсюдження радіосигналу розгортається мережа ПП, яка виконує функції сканування і функції мобільних гетерогенних шлюзів [9–11].

Для екстрених служб на основі групи БС з ЦРС для кожного кластеру створюється безпроводова мережа, що швидко розгортається та дозволяє скоротити час, необхідний для виявлення несанкціонованого МВО. Також передбачається можливість зменшити кількість персоналу, що залучаються для операції з виявлення координат МВО. Крім того, у технічному рішенні (що заявляється) на усіх ПП періодично визначають число і часові затримки компонент декількох променів радіосигналу. Це дозволяє ефективно забезпечити прийом слабких променів у багатопроменовому радіосигналі шляхом їх адаптації до умов розповсюдження, що змінюються, в каналі зв'язку, завдяки періодичному відділенню/виокремленню області багатопроменовості, періодичному пошуку і використанню у кожному періоді різних радіопромнів.

Завдяки використанню у технічному рішенні (що заявляється) більш широкої смуги пропускання в терагерцовому діапазоні, роботі з декількома діапазонами та збільшеній апертурі антенної решітки забезпечується високоточна роздільна здатність для поділу декількох променів розповсюдження та використання інформації про багатопроменове розповсюдження для кращої локалізації та визначення координат МВО.

2. Алгоритм функціонування розробленого способу визначення координати МВО за умов розповсюдження декількох променів радіосигналу.

Етап 1: спочатку розгортають мережу ПП на основі приймально-передавальних ЦРС терагерцового діапазону, інтегровану в існуючу мережу БС мобільного зв'язку з ПОВ даних.

Етап 2: синхронізують роботу всіх ПП у зонах обслуговування БС мобільного зв'язку через механізм синхронізації.

Етап 3: здійснюють безперервне сканування зон обслуговування БС мобільного зв'язку за допомогою систем сканування на основі ЦРС терагерцового діапазону.

Етап 4: приймають віддзеркалений радіосигнал від МВО на кожному з ПП з відомими координатами.

Етап 5: після фіксації радіосигналу першим ПП від МВО передають інформацію про виявлення невідомого об'єкта через канали сигналізації або оповіщення.

Етап 6: формують тимчасовий кластер для збору даних із семи груп ПП і передають ці дані на ПОВ.

Етап 7: за допомогою передавача першого ПП випромінюють радіосигнал зондування на МВО для подальшого збору даних.

Етап 8: приймають віддзеркалений радіосигнал одночасно першим та іншими шістьма ПП, що генерують запитні радіосигнали з цих пунктів.

Етап 9: активують механізм сканування прийому і випромінювання радіосигналів іншими шістьма групами ПП, що дозволяє отримати додаткові вимірювання.

Етап 10: визначають кількість і часові затримки компонентів/компонент декількох променів радіосигналу на всіх ПП.

Етап 11: вимірюють час приходу радіосигналів.

Етап 12: комбінують всі можливі пари ПП із семи груп для отримання проміжних оцінок координат МВО.

Етап 13: вимірюють різницю часу приходу декількох променів радіосигналу від МВО до кожної пари ПП.

Етап 14: на основі різниці часу приходу радіосигналу обчислюють різницю відстаней від МВО до кожної пари ПП.

Етап 15: формують набір проміжних оцінок координат МВО різницево-далекомірним методом для кожної можливої комбінації з трьох ПП, використовуючи дані кластера.

Етап 16: на основі проміжних оцінок формують підсумкову оцінку координат МВО.

Етап 17: після отримання сигналів від усіх груп ПП кластеру, ці дані передають на пункт обробки через мережу БС, де відбувається накопичення та об'єднання даних. Остаточне визначення координати МВО здійснюється на основі підсумкової оцінки.

Технічний результат, як метод визначення координати МВО за умов існування декількох променів розповсюдження радіосигналу, полягає у підвищенні точності вимірювань відстані щодо однопозиційних радіолокаційних систем, а також забезпеченні можливості прийому радіопромінів низького рівня у віддзеркаленому багатопроменевому радіопросторі.

Зазначений результат досягається тим, що у запропонованому способі застосовуються ЦРС в терагерцовому діапазоні, які використовуються як високороздільні радари, що виявляють МВО, який швидко рухається. Також використання ЦРС терагерцового діапазону як систем сканування дозволить системі мобільного зв'язку мати функціональні характеристики систем сканування і забезпечити оптимізацію продуктивності мережі БС мобільного зв'язку, що включає в себе підвищення спектральної ефективності та надійності при мінімізації затримки. Для підвищення ефективності ці системи можуть використовувати такі спільні ресурси, як час, спектр і форму сигналів – безперервну хвилю з трапецеїдальною частотною модуляцією [10; 11], а також апаратні компоненти.

Крім того, використання терагерцових частот забезпечує високий рівень безпеки передачі даних в інтегрованій існуючій мобільній мережі для екстрених служб, яка включає в себе одну або кілька мобільних БС з ЦРС, оскільки цей діапазон частот мало використовується, що робить складним перехоплення сигналів і втручання в передачу [11; 12].

Технічне рішення (що заявляється) додатково дозволяє ефективно забезпечити прийом інформації слабких радіопроменів у багатопроменовому радіопросторі шляхом адаптації до умов розповсюдження, що змінюються, в каналі зв'язку, завдяки періодичному відділенню/виокремленню багатопроменових областей, періодичному пошуку і використанню на кожному періоді оновлених радіопроменів.

Іншою важливою перевагою цього способу є те, що можливість високоточної оцінки координат, отриманої за один цикл обробки інформації в системі, дає суттєвий часовий вииграш в загальному процесі визначення місцезнаходження МВО.

3. Технічні аспекти розробленого способу визначення координати на МВО за умов існування декількох променів розповсюдження радіосигналу для технічної реалізації запропонованого методу.

Суть способу визначення координати МВО за умов існування декількох променів розповсюдження радіосигналу для технічної реалізації запропонованого методу, що заявляється, пояснюється кресленнями, де на рисунку 1 зображено геометричний підхід до визначення координат МВО на основі нового створеного кластеру.

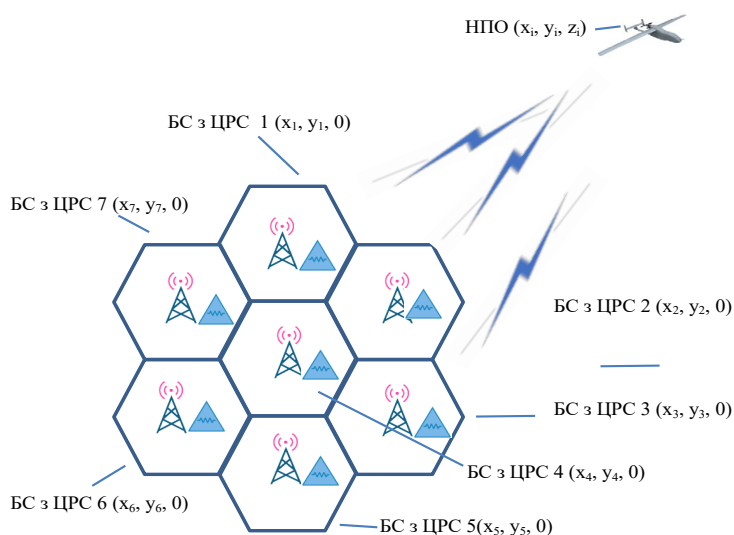


Рис. 1. Геометричний підхід до визначення координат МВО на основі кластеру із семи груп ПП

Спосіб визначення координати несанкціонованого МВО за умов декількох променів розповсюдження радіосигналу, що заявляється, здійснюють наступним чином.

На першому етапі попередньо розгортають мережу ПП на базі ЦРС терагерцового діапазону, яка інтегрується в діючу мережу БС мобільного зв'язку з ПОВ, синхронізують роботу усієї множини ПП різних зон обслуговування БС мобільного зв'язку за допомогою механізму синхронізації, проводять постійне сканування зон обслуговування БС мобільного зв'язку системами сканування, які побудовані на основі ЦРС терагерцового діапазону, за допомогою механізму сканування.

Далі приймають віддзеркалений сигнал від МВО на кожному із множини ПП з відомими координатами, після приймання віддзеркаленого сигналу від першого ПП з загальної множини ПП. По каналах сигналізації передають інформацію про факт фіксації невідомого об'єкта

у зоні функціонування першого ПП, формують тимчасовий кластер збору даних вимірювань з семи груп ПП для передачі даних сканування до ПОВ цього кластеру, випромінюють передавальним пристроєм ЦРС першого ПП сигнал зондування до МВО.

Для збору й обробки даних зондування приймають ретрансляційний віддзеркалений сигнал від МВО одночасно першою та іншими шістьма групами ПП цього кластеру. Це призводить до генерації запитаних сигналів з ПП цього кластеру.

Із практичної точки зору, тимчасовий кластер БС з ЦРС у запропонованому способі складається з семи мобільних БС з ЦРС (див. рис. 1).

Далі запускають механізм процесу сканування випромінювання і прийому сигналів другою, третьою, четвертою, п'ятою, шостою та сьомою групами ПП, що дозволяє отримати додатково шість вимірювань похилої відстані і дванадцять вимірювань суми відстаней. Такий процес відбувається за алгоритмом, наведеним у [12; 13]. На приймальних пристроях усіх семи груп ПП періодично фіксують число і часові затримки компонентів декількох променів радіосигналу.

Для цього визначають часову область багатопроменевості, проводять пошук сигналу в області багатопроменевості та визначають оцінку числа і часових затримок компонент декількох променів радіосигналу, формують оновлені числа і часові затримки компонент різних променів радіосигналу. Знаходять часові затримки компонент променів сигналу поточного періоду, постійно уточнюючи оновлені часові затримки, а також визначають часовий термін обробки компонент променів радіосигналу на основі відповідних рівнянь, формують рішення по прийнятим компонентам багатопроменевого радіосигналу.

Далі вимірюють час приходу радіосигналу з семи груп ПП кластеру. Складають усі можливі пари ПП для формування набору проміжних оцінок координат МВО. Вимірюють для кожної пари ПП різницю часу приходу різних променів радіосигналу МВО до ПП цієї пари. Обчислюють по вимірюваній різниці часу приходу сигналу МВО у кожній парі різницю відстані від МВО до ПП цієї пари.

Після визначення відстані до МВО необхідно обчислити його координати. Для цього формують набір проміжних оцінок координат МВО різницево-далекомірним способом для кожної можливої комбінації з трьох ПП, при цьому формування набору проміжних оцінок координат МВО проводиться з урахуванням даних кластеру з семи груп ПП. Далі на основі набору проміжних оцінок координат МВО формують підсумкову оцінку його координат.

Закінчується технологічний процес формування підсумкової оцінки координат МВО ПОВ координат невідомого МВО, коли сигнали від усіх семи груп ПП кластеру прийняті та передаються на ПОВ по каналах діючої мережі БС мобільного зв'язку з подальшим їх накопиченням та комплексуванням, а визначення координати МВО здійснюють на підставі підсумкової оцінки його координат.

На рисунку 1 вищевказаний процес пояснюється наступним чином. Припустимо, що істинна позиція несанкціонованого МВО – p (x_i, y_i, z_i), а на землі БС з ЦРС отримують віддзеркалений від цього МВО сигнал позиції p_i ($x_i, y_i, 0$). Відстань між цими двома точками розраховується з урахуванням похибки вимірювання, що встановлюється під час сканування. Із кожним отриманим сигналом з несанкціонованого МВО, відстань від нього до мобільної БС з ЦРС визначається виразом (1):

$$d(p_i, p_o) = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 + (z_o)^2} + \varepsilon, \quad (1)$$

де ε – похибка вимірювання.

Таким чином, кількість радіосигналів, що приймаються, і похибка вимірювання ε впливають на точність процесу позиціонування. Позиція p_k (x_k, y_k) визначається шляхом мінімізації виразу (2):

$$\arg \min \sum_{i=1}^m (\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_o)^2} - d(p_i, p_k)), \quad (2)$$

де m – кількість радіосигналів, що приймаються від несанкціонованого МВО.

В результаті мінімізації стає можливим обчислити координати МВО та їхні похибки.

Таким чином, для оцінки можливості визначення координат на основі радіосигналу, що приймається, в розробленій моделі враховується кількість радіосигналів, що приймаються, та помилки їх вимірювання.

Моделювання дозволяє визначити щільність помилки визначення координати при зміні кількості виявлених радіосигналів. На рисунках 2, 3 показано щільність імовірності помилки визначення координати при отриманні 40 та 5 сигналів відповідно з відносною похибкою вимірювання відстані 15 %.

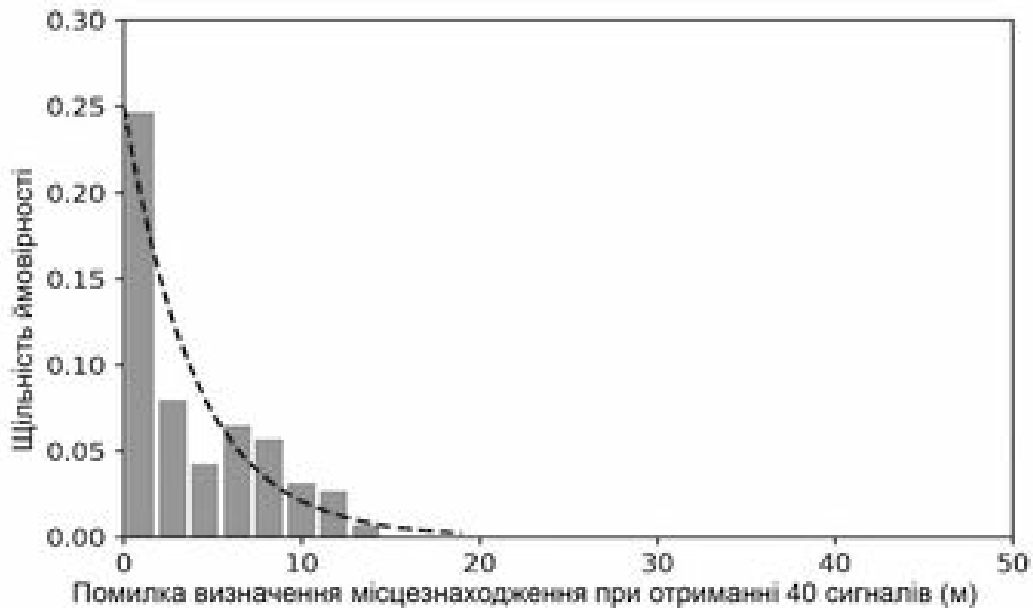


Рис. 2. Щільність ймовірності та гістограма помилки визначення координати при отриманні 40 сигналів

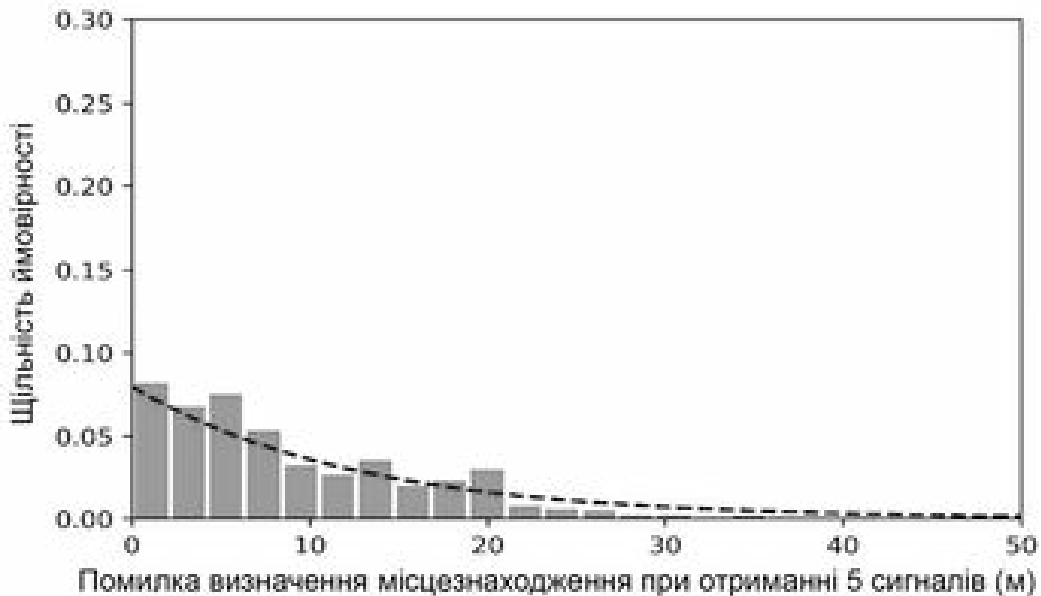


Рис. 3. Щільність ймовірності та гістограма помилки визначення координати при отриманні 5 сигналів

Результати моделювання показують, що помилка визначення координати збільшується, коли збільшується помилка вимірювання відстані. Враховуючи отримані залежності, точність визначення координати може бути досягнута шляхом підвищення якості вимірювання відстані та забезпечення виявлення обробки більшої кількості радіосигналів.

Неможливість успішного вирішення задачі виявлення малорозмірних цілей (зі значенням ЕПР порядку $10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ м}^2$) при використанні відомих методів виділення сигналів на фоні завад призвела до появи нових методів виявлення, що реалізують спільну обробку сигнальної та траєкторної інформації за кілька циклів огляду системою або скомпонованим кластером ПП.

Такі методи, що об'єднуються під загальною назвою «супровід до виявлення» або більш відомим англійським варіантом «track-before-detect» (TBD), дозволяють досягти прийняттого рівня показників ефективності виявлення цілей при відношенні сигнал/шум менше 10 дБ.

Методи TBD, які для досягнення мети використовують сигнальну та траєкторну інформацію за кілька послідовних циклів огляду, в літературі згадуються давно [16–20].

Розробниками запропоновано безліч різних підходів, загальною рисою яких, як правило, є використання статистики на виході пристрою первинної обробки без порівняння з порогом виявлення, що є дуже продуктивним і при використанні, наприклад, методу перевірки множинних гіпотез або фільтра частот, який дозволяє стійко виявляти цілі при відношенні сигнал/шум менше 10 дБ [16].

Недоліком запропонованих алгоритмів є висока складність, яка навіть на сучасному етапі розвитку обчислювальних засобів робить їх практично нереалізованими для малогабаритних РЛС, які мають значні обмеження на масогабаритні характеристики та функціонують у режимі реального часу. Більш практичним підходом є використання розріджених даних (sparse data) у вигляді відміток, отриманих після первинного порівняння зі знизеним порогом виявлення [19].

Однак у публікаціях, наявних у відкритому доступі, автори в основному обмежуються використанням для виявлення 3...5 суміжних циклів огляду, що при забезпеченні гарної швидкодії та відносної простоти запропонованих алгоритмів не дозволяє досягти суттєвих вигравів у пороговому відношенні сигнал/шум понад 3...5 дБ [19].

При цьому питання вибору первинного порогу, який значно впливає на ефективність та швидкодію запропонованих алгоритмів, не розглядається. Тому з цієї точки зору, становлять інтерес недавні дослідження, де запропонована процедура TBD показала відносно високу ефективність виявлення малорозмірних цілей. Так, використання 3-4 циклів огляду дозволяє підвищити еквівалентний енергопотенціал РЛС на 2–3 дБ, а 5-6 циклів огляду на 4–5 дБ.

Але недоліком такого підходу є те, що підвищення практичності застосування запропонованого методу залежить тільки від підвищення темпу огляду до розумних значень, які не призведуть до значних втрат енергетики завдяки зниженню ефективності когерентного накопичення. При цьому комплексування вимірювань близько розташованими стільниками на основі запропонованого методу, наведеного вище, дозволяє зменшити вплив малої кількості точок вимірювань в певних областях і спрогнозувати траєкторію руху МВО.

Висновки

1. Таким чином, підвищення ефективності застосування способу визначення координати МВО за умов існування декількох променів розповсюдження радіосигналу, що заявляється, порівняно з прототипом, полягає в тому, що шляхом застосування радіорелейних систем терагерцового діапазона в інтегрованій існуючій БС мобільного зв'язку, що використовуються як високороздільні радары тимчасового кластеру збору даних вимірювань з семи груп ПП для передачі даних сканування до ПОВ, забезпечується виявлення МВО та більш висока точність вимірювання координат.

Також використання ЦРС терагерцового діапазону як систем сканування дозволить системі мобільного зв'язку мати функціональні характеристики систем сканування і забезпечити оптимізацію продуктивності мережі БС мобільного зв'язку, що включає в себе підвищення спектральної ефективності та надійності при мінімізації затримки.

Для підвищення ефективності ці системи використовують такі спільні ресурси, як час та спектр. Крім того, використання терагерцових частот забезпечує високий рівень безпеки передачі даних в інтегрованій існуючій мобільній мережі для екстрених служб.

2. Підвищення ефективності застосування способу визначення координати МВО за умов існування декількох променів розповсюдження радіосигналу, що заявляється, порівняно з прототипом, передбачає додаткові технологічні операції:

розгортання мережі ПП на базі радіорелейних систем терагерцового діапазону, яка інтегрується в діючу мережу БС мобільного зв'язку;

проведення постійного сканування зон обслуговування БС мобільного зв'язку системами сканування, які побудовані на основі ЦРС терагерцового діапазону за допомогою механізму сканування;

формування тимчасового кластеру ПП для збору даних вимірювань із семи груп для передачі даних сканування до ПОВ цього кластеру;

періодичне визначення на приймальних пристроях усіх груп ПП кількості і часових затримок компонент віддзеркалених променів радіосигналу;

оцінювання підсумкової оцінки координат МВО ПОВ координати невідомого повітряного об'єкта, коли радіосигнали від усіх семи груп ПП кластеру прийняті;

підвищення ефективності мережі ПП на базі ЦРС терагерцового діапазону, яка інтегрується в діючу мережу БС мобільного зв'язку, шляхом використання спільних часових, спектральних ресурсів і апаратних компонентів;

підвищення точності вимірювань дальності щодо однопозиційних радіолокаційних систем, можливості прийому променів низького рівня у віддзеркаленому багатопроменевому радіосигналі.

3. Технічне рішення (що заявляється) може бути використано як фрагмент міської системи протиповітряної оборони, що забезпечує раннє попередження загрози від несанкціонованого МВО, що надходять, шляхом модифікації роботи БС мобільного зв'язку.

Подальшими напрямками наукових досліджень цієї роботи є:

оптимізація кількості радіопроменів при використанні терагерцового діапазону хвиль для зменшення вимог до апаратури;

подальший розгляд питань на основі запропонованої пропозиції і розробка удосконаленого методу TBD для поліпшення точності визначення координат.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Howland P. E., Maksimiuk D., Reitsma G. FM radio based bistatic radar. *IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation*. 2005. P. 107–115. DOI: 10.1049/ip-rsn: 20045077.
2. Samczyński P., Wilkowski M., Kulpa K. Trial results on bistatic passive radar using non-cooperative pulse radar as illuminator of opportunity. *INTL – International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2012. P. 171–176.
3. Honda J., Otsuyama T. Feasibility study on aircraft positioning by using ISDB-T signal delay. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*. 2016. P. 1787–1790.
4. Howland P. E. Target tracking using television-based bistatic radar. *IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation*. 1999. P. 166–174.
5. Salah A. Experimental study of LTE signals as illuminators of opportunity for passive bi-static radar applications / Abdullah R.S.A. Raja, A. Ismail, F. Hashim, Aziz N.H. Abdul. *Electronics Letters*. 2014. P. 545–547. DOI: 10.1049/el.2014.0237.

6. Chen P. C. A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation. *Proc. IEEE Wireless Communications Networking Conference*. 1999. Vol 1. P. 316–320.
7. Cong L., Zhuang W. Non-line-of-sight error mitigation in TDOA mobile location. *Proc. IEEE Globecom*. Nov 2001. P. 680–684.
8. Європейський патент EP 3173809, ПМК кл. G01S 5/06, G0 5/02; опубл. 31.05.2017.
9. Сайко В. Г., Наритник Т. М. Безпроводові системи зв'язку терагерцового діапазону: монографія. Німеччина: Видавництво «LAP LAMBERT Academic Publishing RU», 2019. 68 с.
10. Сайко В. Г. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія / В. Г. Сайко, Р. С. Одарченко, А. О. Абакумова, Т. М. Наритник, В. С. Наконечний, В. М. Домрачев, С. В. Толюпа, В. Ю. Заблоцький, П. Ф. Баховський. К.: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
11. Saiko V., Odarchenko R., Zhurakovskiy B., Yevdokymenko M., Fesenko V., Tkachova O. A Model for Building a Wireless Terahertz Network for 5G NR. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS*. 2023. P. 1071–1076.
12. Сайко В. Г., Радзівілов Г. Д., Комаров В. О., Фомін М. М., Солодовник В. І., Криволапов Я. В., Криволапов Г. Я. Алгоритм визначення координати несанкціонованого БПЛА за умов декількох променів розповсюдження сигнал // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 35 (74). 2024. № 1. С. 74–80.
13. Zhu X., Feng Y. RSSI-based algorithm for indoor localization. *Communications and Network*. 2013. Vol. 5 (02). P. 37–42.
14. Tonissen S. M., Bar-Shalom Y. Maximum likelihood track-before-detect with fluctuating target amplitude. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1998. № 34. P. 796–809.
15. Hadzagic M., Michalska H., Lefebvre E. Track-Before-Detect Methods in Tracking Low-Observable Targets: A Survey. *Sensors & Transducers Magazine (S&T e-Digest)*. 2005. Special Issue, August. P. 374–380.
16. Davey J. S., Rutten M. G., Cheung B. A. Comparison of Detection Performance for Several Track-before-Detect Algorithms. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2008. P. 1–10.
17. Orlando D., Venturino L., Lops M., Ricci G. Track-Before-Detect Strategies for STAP Radars. *IEEE Trans. Signal Process.* 2010. № 58. P. 933–938.
18. Nicomino F., Addabbo P., Clemente C., Biondi F., Giunta G., Orlando D. A Track-Before-Detect Strategy Based on Sparse Data Processing for Air Surveillance Radar Applications. *Remote Sensing*. 2021. № 13. P. 2–19.
19. Неуймин А. С., Жук С. Я. Обнаружение цели в импульсно-доплеровской РЛС на основе многообзорного накопления сигналов. *Вестник Национального технического университета Украины «КПИ»*. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратостроєння. 2013. № 53. С. 89–97.
20. Saiko V., Toliupa S., Brailovskiy M., Narytnyk T., Nakonechniy V., Shtanenko S.. Mathematical Simulation of FMCW Radar Operation: Simulation of the Normalized Signal at the Receiver Input. *5th IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2023 – Proceedings*. 2023. С. 140–146. DOI: 10.1109/AICT61584.2023. 21–25 Nov. 2023. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/10452416/proceeding>.
21. Сайко В. Г., Романов Д. О., Наритник Т. М., Комаров В. О., Фомін М. М. Аналіз перспектив використання терагерцового діапазону частот для безпроводових мереж зв'язку спеціального призначення. *Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: збірник наукових праць ВІТІ*. 2024. № 5. С. 138–153.
22. Saiko V., Lukova-Chuiko N., Zhurakovskiy B., Nakonechniy V., Brailovskiy M. A Method of Increasing the Reliability of Heterogeneous 5G/IoT Special Communication Networks when Using the Terahertz Wave Range. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. 3384. P. 120–131.
23. Saiko V., Nakonechniy V., Brailovskiy M., Toliupa S. Models of improving the efficiency of radio communication systems using the terahertz range. *2020 IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunication Science and Technology. PIC S and T 2020 – Proceedings*. P. 192–196.