

Сайко В.Г.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Радзівілов Г.Д.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Фомін М.М.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Солодовник В.І.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Криволапов Я.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Криволапов Г.Я.

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНОГО БПЛА ЗА УМОВ БАГАТОПРОМЕНЕВОГО ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Наведено алгоритм визначення місцезнаходження несанкціонованого БПЛА за умов багатопроменевого поширення радіохвиль та модель його реалізації. Ключовою відмінністю інноваційного рішення від традиційних сучасних рішень, є те, що для забезпечення реалізації алгоритму визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль розгортається мережа приймальних пунктів (ПП) на базі цифрових приймально-передавальних радіорелейних систем (ЦРС) терагерцового діапазону, яка інтегрується в діючу мережу базових станцій (БС) мобільного зв'язку та виконує функції сканування і мобільних гетерогенних ілюзів. На основі сформованого кластеру груп БС з ЦРС створюється безпроводова мережа, що швидко розгортається, для екстрених служб, яка дозволяє скоротити час, необхідний для виявлення несанкціонованого БПЛА, і зменшити кількість персоналу, що залучаються для операції з виявлення місцезнаходження. Крім того, у інноваційному рішенні визначають періодично на приймальних пристроях усіх ПП число і часові затримки компонент багатопроменевого сигналу, що дозволяє ефективно забезпечити прийом слабких променів в багатопроменевому сигналі шляхом адаптації до умов поширення, що змінюються, в каналі зв'язку, за рахунок періодичного відділення області багатопроменевої, періодичного пошуку і використання на кожному періоді оновлених променів. Завдяки використанню більш широкої смуги пропускання у терагерцовому діапазоні, роботі з декількома діапазонами забезпечується високоточна роздільна здатність для поділу багатопроменевого поширення та використання інформації про багатопроменеве поширення для кращої локалізації та визначення місцезнаходження несанкціонованого БПЛА.

Ключові слова: несанкціонований БПЛА, радіорелейні системи терагерцового діапазону, мобільні мережі, інтеграція сканування та зв'язку.

Постановка проблеми. Сьогодні основна мета проектування бездротової мережі – оптимізація продуктивності зв'язку, що включає підвищення спектральної ефективності і надійності при мінімізації затримки та енергоспоживання. Таким

чином, зараз як ніколи необхідні більш інформативні, ефективні та гнучкі системи зв'язку, які покращують якість обслуговування та охоплення за рахунок різноманітних сценаріїв використання, так само як і сенсорні системи, які надають необ-

хідні знання про навколишнє середовище. Традиційна практика включає дві різні радіолокаційні і комунікаційні підсистеми, які обмінюються обмеженим обсягом інформації для досягнення певного рівня пізнання. Але цей підхід має багато недоліків, таких як великі накладні витрати, великий обсяг даних, неефективність і громіздкість підсистем. Альтернативний підхід ґрунтується на тому факті, що в майбутніх бездротових системах очікується значне зрушення у бік більш високих частот, таких як терагерцовий діапазон, з ширшим доступним спектром. Це дозволить системам зв'язку мати функціональні характеристики радіолокаційних систем. Отже, щоб зменшити, як потужність, деякі апаратні компоненти можуть використовуватися спільно двома типами систем, наприклад антени, підсилювачі потужності і генератори. Крім того, для підвищення ефективності ці системи можуть використовувати такі спільні ресурси, як час та спектр. Це відкриє користувачам доступ до інших функцій таких систем, таких як сканування/візуалізація та локалізація, тим самим представивши безліч інноваційних застосувань та підвищивши продуктивність майбутньої бездротової системи. В інтегрованій системі сканування та зв'язку (integrated sensing and communication, ISAC) сканування та зв'язок будуть двома взаємодоповнюючими функціями [1, 2].

Але на сьогодні механізми реалізації даного підходу [2] знаходяться в стадії розробок і дослідження. Усе це загалом і визначило мету та завдання даної роботи.

Сьогодні основна мета проектування бездротової мережі – оптимізація продуктивності зв'язку, що включає підвищення спектральної ефективності і надійності при мінімізації затримки та енергоспоживання. Таким чином, зараз як ніколи необхідні більш інформативні, ефективні та гнучкі системи зв'язку, які покращують якість обслуговування та охоплення за рахунок різноманітних сценаріїв використання, так само як і сенсорні системи, які надають необхідні знання про навколишнє середовище. Традиційна практика включає дві різні радіолокаційні і комунікаційні підсистеми, які обмінюються обмеженим обсягом інформації для досягнення певного рівня пізнання. Але цей підхід має багато недоліків, таких як великі накладні витрати, великий обсяг даних, неефективність і громіздкість підсистем. Альтернативний підхід ґрунтується на тому факті, що в майбутніх бездротових системах очікується значне зрушення у бік більш високих частот, таких як терагерцовий діапазон, з ширшим доступним спектром. Це

дозволить системам зв'язку мати функціональні характеристики радіолокаційних систем. Отже, щоб зменшити, як потужність, деякі апаратні компоненти можуть використовуватися спільно двома типами систем, наприклад антени, підсилювачі потужності і генератори. Крім того, для підвищення ефективності ці системи можуть використовувати такі спільні ресурси, як час та спектр.

Це відкриє користувачам доступ до інших функцій таких систем, таких як сканування/візуалізація та локалізація, тим самим представивши безліч інноваційних застосувань та підвищивши продуктивність майбутньої бездротової системи. В інтегрованій системі сканування та зв'язку (integrated sensing and communication, ISAC) сканування та зв'язок будуть двома взаємодоповнюючими функціями [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час розгорнуто широкі дослідження щодо використання комерційних передавачів FM і DAB – радіо, цифрового телебачення (форматів DVB-T, DVB-T2) та сигналів базових станцій стільникового зв'язку для виявлення повітряних об'єктів (ПО) [3–6]. При цьому такими фірмами, як Thales (Франція), Lockheed Martin (США), ERA (Чеська Республіка), Leonardo (Італія) та ін., проводяться інтенсивні дослідження з розробки та проектування радіолокаційних комплексів, що одночасно використовують кілька сторонніх передавачів різних діапазонів. На думку розробників, створення маловисотного радіолокаційного поля, що доповнює штатні засоби радіолокаційного спостереження, суттєво підвищить достовірність та надійність радіолокаційного спостереження ПО. У [6] наведені результати досліджень та експериментальні дані щодо застосування радіосистем стандарту бездротової передачі даних LTE для виявлення об'єктів, що рухаються.

Відомий спосіб зменшення помилок багатопроменевої при оцінюванні розташування джерела випромінювання далекомірним способом, який полягає в тому, що місцезнаходження джерела випромінювання (ДВ) знаходять алгоритмом зважених залишків оцінок координат, отриманих на основі далекомірних вимірювань від різних комбінацій приймальних станцій. [7].

До недоліків відомого способу зменшення помилок багатопроменевої при оцінюванні розташування джерела випромінювання далекомірним відноситься те, що для оцінювання місцезнаходження ДВ необхідно тривалий час, викликаний необхідністю накопичення і зважування проміжних оцінок протягом деякого інтервалу часу, що

не дозволяє використовувати зазначений спосіб для визначення координат ДВ, що рухаються.

Відомий також спосіб визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль, який полягає в тому, що приймають віддзеркалений сигнал від низько літаючого повітряного об'єкту (НПО) на кожному з множини приймальних пунктів з відомими координатами, вимірюють час приходу сигналу, формують набір проміжних оцінок координат НПО різницево-далекомірним способом для кожної можливої комбінації з трьох ПП, формують, на основі набору проміжних оцінок координат НПО, підсумкову оцінку координат НПО, а визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту здійснюють на підставі підсумкової оцінки координат НПО [8].

Недоліками способу визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль, який обрано за найближчий аналог для подальшого дослідження, є те, що під час проведення процедури пошуку сигналів променів не враховується вплив компонент багатопроменевого сигналу друг на друга. Внаслідок цього збільшується ймовірність помилкового виявлення сигналів променів. Крім того, не здійснюється оптимізація числа променів при використанні терагерцового діапазону хвиль, що призводить до підвищених вимог до апаратурної реалізації без збільшення точності визначення місцезнаходження. Також для отримання попередньо заданого порога автори використовують попередньо отриману емпіричну залежність дисперсії оцінки координат від відношення сигнал/шум. Ознакою її реалізації вимагає значної кількості попередніх вимірів і відповідно тимчасового терміну.

Постановка завдання. В основу даного дослідження покладено задачу шляхом введення додаткових технологічних операцій у [8] забезпечити підвищення ефективності мережі ПП, 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 багатопроменовому сигналі.

Виклад основного матеріалу

Алгоритм інноваційного рішення визначення місцезнаходження несанціонованного БПЛА за умов багатопроменевого поширення радіохвиль

З урахуванням зазначених особливостей для реалізації алгоритму виконують таку послідовність дій:

- попередньо розгортають мережу приймальних пунктів на базі приймально-передавальних цифрових радіорелейних систем терагерцового діапазону, яка інтегрується в діючу мережу базових станцій мобільного зв'язку з пунктом обробки вимірювань;

- синхронізують роботу усієї множини ПП зон обслуговування БС мобільного зв'язку за допомогою механізму синхронізації;

- проводять постійне сканування зон обслуговування базових станцій мобільного зв'язку системами сканування, що побудовані на основі радіорелейних систем терагерцового діапазону, за допомогою механізму сканування;

- приймають віддзеркалений сигнал від низько літаючого повітряного об'єкту на кожному з множини приймальних пунктів з відомими координатами;

- після приймання віддзеркаленого сигналу від низько літаючого повітряного об'єкту першим ПП з множини ПП від повітряного об'єкту, передають по каналам сигналізації інформацію про факт фіксації невідомого повітряного об'єкту у зоні функціонування першого ПП;

- формують тимчасовий кластер збору даних вимірювань з семи груп ПП для передачі даних сканування до пункту обробки вимірювань даного кластеру;

- випромінюють передавальним пристроєм радіорелейної системи першого ПП сигнал зондування на низько літаючий повітряний об'єкт для збору і обробки даних зондування;

- приймають ретрансляційний віддзеркалений сигнал від низько літаючого повітряного об'єкту одночасно першим і іншими шістьма групами ПП кластеру, що приводить до генерації запитних сигналів з цих ПП кластеру;

- запускають механізм сканування процесу випромінювання і прийому сигналів другої, третьої, четвертої, п'ятої, шостої та сьомої груп ПП, що дозволяє отримати додатково шість вимірювань похилої дальності і дванадцяти вимірювань суми відстаней;

- визначають періодично на приймальних пристроях усіх семи груп ПП число і часові затримки компонентів багатопроменевого сигналу;

- вимірюють час приходу сигналу;

- складають з семи груп ПП кластеру усі можливі пари ПП для формування набору проміжних оцінок координат ПО;

– вимірюють для кожної пари ПП різницю часу приходу багатопроменевого сигналу від повітряного об'єкту до ПП цієї пари;

– обчислюють по вимірюваній різниці часу приходу сигналу від повітряного об'єкту у кожній парі різницю дальності від повітряного об'єкту до приймальних пунктів цієї пари;

– формують набір проміжних оцінок координат НПО різницево-далекомірним способом для кожної можливої комбінації груп з трьох ПП, при цьому формування набору проміжних оцінок координат НПО проводиться з урахуванням даних кластеру з усіх семи груп ПП;

– формують, на основі набору проміжних оцінок координат НПО, підсумкову оцінку координат НПО;

– оцінюють підсумкову оцінку координат НПО пунктом обробки вимірювань місцезнаходження невідомого повітряного об'єкту, коли сигнали від усіх семи груп ПП кластеру прийняти, які передаються на пункт обробки вимірювань по каналах діючої мережі БС мобільного зв'язку, з подальшим їх накопиченням та комплексуванням. А визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту здійснюють на підставі підсумкової оцінки координат НПО.

Модель реалізації алгоритму інноваційного рішення

Ефективність операцій з виявлення місцезнаходження несанкціонованого НПО у запропонованому методі підвищується за рахунок використання технологій автоматичного виявлення невідомого НПО із використанням інтегрованої існуючої мережі мобільного зв'язку (ПМС) для екстрених служб. ПМС включають одну або кілька БС мобільного зв'язку з ЦРС (БС з ЦРС), які виконують функції сканування і мобільних гетерогенних шлюзів. На основі групи БС з ЦРС створюється безпроводова мережа, що швидко розгортається, для екстрених служб, яка дозволяє скоротити час, необхідний для виявлення несанкціонованого НПО, і зменшити кількість персоналу, що залучаються для операції з виявлення місцезнаходження.

У такій мережі всі БС з ЦРС взаємодіють як один з одним, так і зі екстрених службами одночасно. БС з ЦРС не тільки миттєво доставляє агреговані дані на засоби екстрених служб по каналам мобільної мережі, але також має можливість обмінюватись даними один з одним. Більш того, пориста топологія мережі дозволяє багаторазово гарантувати надійність і збіжність мережі, тому що під час виявлення несанкціонованого НПО деякі ЦРС можуть бути відключені по різним при-

чинам, а дані все одно можуть бути передані до базової станції мережі мобільного зв'язку через інші БС шляхом ретрансляції. Крім того, завдяки групам БС з ЦРС можуть бути вирішені такі проблеми, як мала зона радіопокриття, збої в роботі мережі через відмову вузлів ретрансляторів та обмежене керування, що виникають при використанні одиночних радіолокаційних станцій.

У операціях з виявлення місцезнаходження несанкціонованого НПО групи БС з ЦРС можуть використовувати різні технології. Серед бездротових технологій, що використовуються для визначення місцезнаходження несанкціонованого НПО, можна виділити мережі 2/3/4/5G [9, 10]. Технології виявлення можуть застосовуватися разом із системою комп'ютерного зору, що підвищить ефективність запропонованого способу за наявності прямої видимості між НПО та БС з ЦРС, а також за відсутності опадів природного та штучного походження.

На рис.1 наведено схему організації цифрового радіорелейного зв'язку для передачі інформації на пункт управління мережею ЦРС терагерцового діапазону через вузлову приймально-передавальну ЦРС та приймально-передавальні модулі на 0,13 ТГц.

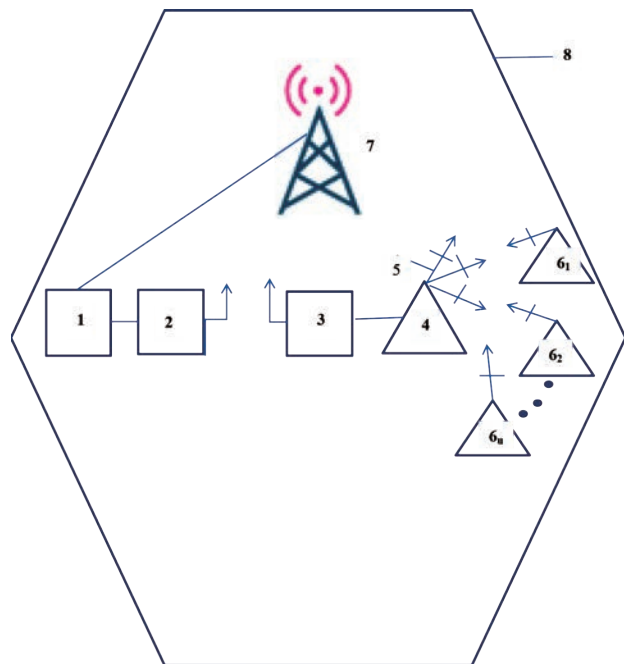


Рис. 1. Схема організації цифрового радіорелейного зв'язку для передачі інформації на пункт управління мережею ЦРС терагерцового діапазону через вузлову ЦРС та приймально-передавальні модулі

Даний процес пояснюється таким чином з використанням рис. 1 на якій позначено:

1 – пункт управління мережею цифровою РС терагерцового діапазону;

- 2, 3 – приймально-передавальні модулі терагерцового діапазону частот;
- 4 – вузлова цифрова радіорелейна станція;
- 5 – фазована антенна решітка з електрично керованими діаграмами спрямованості;
- 6_{1...u} – цифрові радіорелейні станції;
- 7 – базова станція;
- 8 – зона обслуговування базової станції.

Вузлова ЦРС 4 «точка-багатоточка» являється пакетною та має на кожному з N – напрямків пропускну здатність 2,4 Гбіт/с. Пакетна технологія дозволяє «попередньо» передавати потоки зі швидкістю 2,4 Гбіт/с на приймально-передавальний модуль терагерцового діапазону частот 2, 3, який весь трафік N*2.4 Гбіт/с передає на пункт управління мережею 1 ЦРС 6_{1...u} терагерцового діапазону, тому передача мультимедійної, графічної та іншої інформації здійснюється в терагерцовому діапазоні. Висока скритність передачі інформації забезпечується особливостями терагерцового діапазону хвиль.

Для проведення процесу сканування зон обслуговування 8 БС мобільного зв'язку 7 вузлова ЦРС «точка-багатоточка» 4 має у своєму складі фазовані антенні решітки з електрично управляємими діаграмами спрямованості 5 та приймально-передавальні модулі терагерцового діапазону частот 2, 3 [9, 11].

Рис. 2 пояснює геометричний підхід до визначення координат.

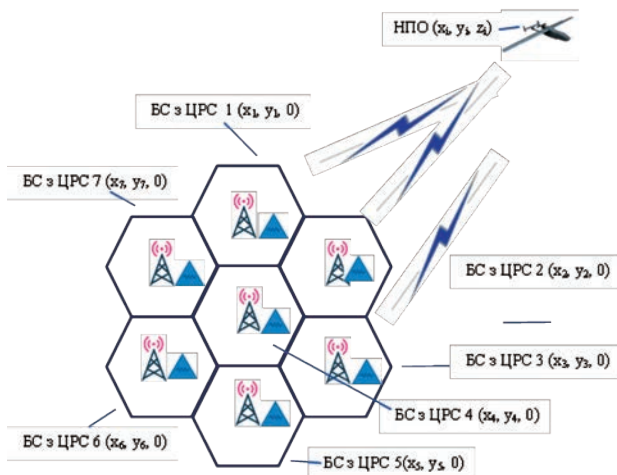


Рис. 2. Геометричний підхід до визначення координат НПО на основі груп з трьох ПП кластеру

Припускаючи, що несанкціонований НПО знаходиться в повітрі, необхідно знайти координату розташування несанкціонованого НПО (x_i, y_i, z_i) та i-ю позицію на землі БС з ЦРС (x_i, y_i, 0) при отриманні віддзеркаленого сигналу від НПО. Якщо

БС з ЦРС отримують m сигналів від несанкціонованого НПО, координати точки визначення місцезнаходження повинні задовольняти рівнянням (1):

$$\begin{cases} (x_1 - x_0) + (y_1 - y_0) + (z_0)^2 = (d_1)^2 \\ (x_i - x_0) + (y_i - y_0) + (z_0)^2 = (d_i)^2 \\ (x_m - x_0) + (y_m - y_0) + (z_0)^2 = (d_m)^2 \end{cases} \quad (1)$$

де d_i – відстань від БС з ЦРС до несанкціонованого НПО.

З практичної точки зору тимчасовий кластер БС з ЦРС у запропонованому способі складається з семи груп БС з ЦРС.

У бездротовій мережі з урахуванням моделей поширення радіохвиль оцінюють втрати потужності сигналу під час поширення через середовище. Так, потужність сигналу, що приймається менше потужності переданого. Для прогнозування різниці між сигналами, що передаються і приймаються [12, 13], потужність кожного прийнятого радіосигналу вимірюють за допомогою показника рівня прийнятого сигналу (Received Signal Strength Indicator – RSSI). Відстань на базі показників RSSI, як правило, розраховується на основі моделі логарифмічної втрати потужності сигналу при поширенні в середовищі:

$$RSSI = A - 10 * n * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (2)$$

де d – відстань від пристрою до передавача (м); A – потужність сигналу пристрою, виміряна на одиничній відстані d₀ від пристрою (дБм); n – коефіцієнт втрат потужності сигналу при поширенні в середовищі, показник пов'язаний із конкретною технологією бездротового зв'язку; X_σ – Гауссовий розподіл випадкової змінної з нульовим середнім значенням та дисперсією σ².

Оскільки втрата потужності сигналу при поширенні в середовищі залежить від навколишнього середовища, для підвищення точності позиціонування в запропонованому рішенні необхідно оцінити параметри A, n перед розгортанням операції визначення місцезнаходження. Отже, у кожній конкретній операції визначення місцезнаходження, група БС з ЦРС 6_{1...u} (див. рис. 1) здійснює попереднє калібрування на основі даних сканування ЦРС 6_{1...u}, тобто показник RSSI розраховується, враховуючи відстань між НПО і початковою точкою, вимірювання проводиться кілька разів. Потім для знаходження оптимальних параметрів (A, n) використовується нелінійний метод найменших квадратів. При вимірах m ці параметри визначаються як:

$$(A, n) = \operatorname{argmin} \left(\sum_{i=1}^m 10^{\frac{A-RSSI}{10n}} - d_i \right)^2 \quad (3)$$

Після визначення відстані до НПО необхідно обчислити координати НПО.

Для цього припустимо, що позиція несанкціонованого НПО $p(x_i, y_i, z_i)$, а на землі БС з ЦРС отримують віддзеркалений від НПО сигнал позиції $p_i(x_i, y_i, 0)$. Відстань між цими двома точками розраховується з урахуванням похибки вимірювання, що встановлюється під час сканування. З кожним отриманим сигналом з несанкціонованого НПО, відстань від нього до БС з ЦРС:

$$d(p_i, p_0) = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_0)^2} + \varepsilon, \quad (4)$$

Таким чином, кількість сигналів, що приймаються, і похибка вимірювання ε впливають на точність процесу позиціонування. Позиція $p_k(x_k, y_k)$ визначається шляхом мінімізації виразу (5):

$$\arg \min \sum_{i=1}^m \left(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_0)^2} - d(p_i, p_k) \right) \quad (5)$$

де m – кількість сигналів, що приймаються від несанкціонованого НПО.

В результаті мінімізації стає можливим обчислити координати НПО та похибки.

Моделювання дозволяє визначити помилки місцезнаходження при зміні кількості виявлених сигналів. На рис. 3 показано залежність помилки місцезнаходження від кількості сигналів, що приймаються. Згідно з рис. 3 координати визначаються з меншою помилкою, коли виявляється більша кількість сигналів.

Висновки

1. Технічний результат в запропонованому методі визначення місцезнаходження низьколітаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль полягає в підвищенні точності вимірювань дальності щодо однопозиційних радіолокаційних систем, а також забезпеченні можливості прийому променів низь-

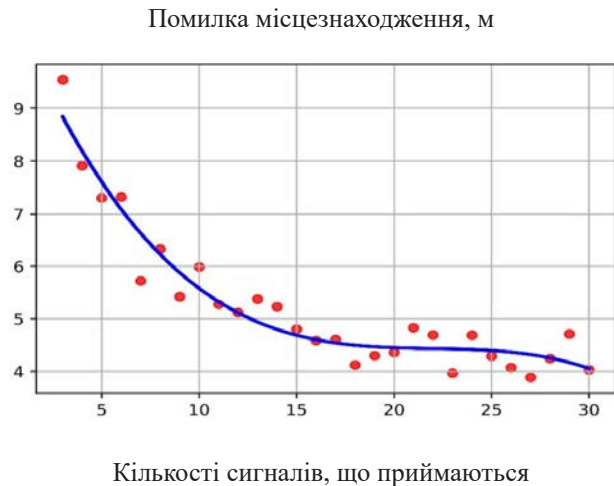


Рис. 3. Залежність помилки місцезнаходження від кількості сигналів, що приймаються

кого рівня у віддзеркаленому багатопроменевому сигналі.

2. Зазначений результат досягається тим, що у запропонованому рішенні застосовуються цифрові радіорелейні системи в терагерцовому діапазоні, які використовуються в якості високороздільних радарів, що виявляють несанкціонованих БПЛА, що швидко рухаються.

3. Інноваційне рішення дозволяє ефективно забезпечити прийом інформації слабких променів в багатопроменевому сигналі шляхом адаптації до умов поширення, що змінюються, в каналі зв'язку, за рахунок періодичного відділення області багатопроменевої, періодичного пошуку і використання на кожному періоді оновлених променів.

4. Інноваційне рішення може бути використано як міська система протиповітряної оборони, що забезпечує раннє попередження загрози, що надходять, шляхом модифікації БС мобільного зв'язку.

Список літератури:

1. M. Chafii, L. Bariah, S. Muhaidat, and M. Debbah. Twelve Scientific Challenges for 6G: Rethinking the Foundations of Communications Theory. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023. vol. 25. no. 2, pp. 868–904.
2. A. Liu, Z. Huang, M. Li, Y. Wan, W. Li, T. X. Han, C. Liu, R. Du, D. K. P. Tan, J. Lu, Y. Shen, F. Colone, and K. Chetty. A Survey on Fundamental Limits of Integrated Sensing and Communication. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. vol. 24. no. 2. pp. 994–1034.
3. Bendjama L., Laroussi T. GLRT-based passive bistatic radar: A performance comparison of illuminators of opportunity. *2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC ASET)*. 2018. pp. 54–59.
4. Capria A. DVB-T passive radar for vehicles detection in urban environment. *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2010. pp. 3917–3920.
5. Howland P.E., Maksimiuk D., Reitsma G. FM radio based bistatic radar. *IEE Proceed – ings – Radar, Sonar and Navigation*. 2005. pp. 107–115.
6. Salah A. Experimental study of LTE signals as illuminators of opportunity for passive bi-static radar applications. *Electronics Letters*. 2014. pp. 545–547.

7. Chen, P.C. A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation. *Proc. IEEE Wireless Communications Networking Conference*. 1999. vol 1. pp. 316-320.
8. Європейський патент EP 3173809, ПМК кл. G01S 5/06, G0 5/02, опубліковано 31.05.2017.
9. Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толюпа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія. Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
10. Кравчук С.О. Теорія систем мобільних інфокомунікацій. Системна архітектура. Київ, КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. 682 с.
11. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Безпроводові системи зв'язку терагерцового діапазону: монографія. Видавництво "LAP LAMBERT Academic Publishing RU", 2019. 68 с.
12. Chung, W. Y. Enhanced RSSI-based real-time user location tracking system for indoor and outdoor environments. In *2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007)*, IEEE. 2007. pp. 1213–1218.
13. Zhu, X. RSSI-based algorithm for indoor localization. *Communications and Network*. 2013. vol. 5(02). pp. 37–42.

Saiko V.G., Radzivilov G.D., Komarov V.O., Fomin M.M., Solodovnyk V.I., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya. ALGORITHM FOR DETERMINING THE LOCATION OF AN UNAUTHORIZED UAV UNDER THE CONDITIONS OF MULTIBEAM PROPAGATION OF RADIO WAVES

An algorithm for determining the location of an unauthorized UAV under the conditions of multi-beam propagation of radio waves and a model for its implementation are presented. The key difference between the innovative solution and the traditional modern solutions is that in order to ensure the implementation of the algorithm for determining the location of a low-flying aerial object under the conditions of multi-beam propagation of radio waves, a network of receiving points (PP) is deployed on the basis of digital receiving and transmitting radio relay systems (TRS) of the terahertz range, which is integrated into the existing network of base stations (BS) of mobile communication and performs the functions of scanning and mobile heterogeneous gateways. Based on the formed cluster of BS groups with the CRS, a rapidly deployable wireless network for emergency services is created, which allows to reduce the time required to detect an unauthorized UAV and reduce the number of personnel involved in the location detection operation. In addition, in the innovative solution, the number and time delays of the components of the multibeam signal are determined periodically on the receiving devices of all PPs, which makes it possible to effectively ensure the reception of weak beams in the multibeam signal by adapting to the changing propagation conditions in the communication channel, due to periodic separation multi-beam areas, periodic search and use of updated beams at each period. By using a wider bandwidth in the terahertz range, multi-band operation provides high-precision resolution for multipath separation and the use of multipath information to better localize and locate an unauthorized UAV.

Key words: *unsanctioned UAV, terahertz radio relay systems, mobile networks, scanning and communication integration.*