

УДК 621.391

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

СПОСІБ ТА ІНТЕГРОВАНІЙ КОМПЛЕКС ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ НАЗЕМНИХ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ НА БАЗІ БПЛА СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Інноваційне рішення належить до галузі електронних комунікацій та радіотехніки, зокрема до способів позиціонування джерела радіовипромінювання (ДРВ), а саме до способів визначення місцезнаходження джерел випромінювання у ворожому середовищі, і може бути використане в навігаційних, пеленгаційних, локаційних засобах під час вирішення задачі прихованого визначення координат джерел радіовипромінювань, зокрема визначення координат ДРВ з борту літального апарата (ЛА). Підвищення ефективності застосування інтеграційного комплексу визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення порівняно з відомими рішеннями відбувається завдяки додатковому введенню до складу портативного багатофункціонального засобу визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента інтелектуального датчика (сенсора) електромагнітної обстановки, системи управління інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА. При цьому інфраструктура моніторингу територій угрупованнями ЛА виконана у вигляді з'єднаних між собою груп безпілотних літальних апаратів (БпЛА), які складають другий рівень літаючого сегмента та є мобільними точками доступу, та з'єднаних між собою груп головних БпЛА, що складають перший рівень літаючого сегмента, що здійснюють ретрансляцію прийнятих/переданих даних до базової станції мобільного зв'язку, яка функціонує у штатному режимі. Інноваційне рішення забезпечує підвищення ефективності функціонування інфраструктури інтегрованого комплексу визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення в умовах використання противником наземних джерел випромінювання зі спрямованими антенами та які працюють на низьких потужностях, шляхом спільного використання даних масивів первинних вимірювань портативного багатофункціонального засобу визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента та вимірювань груп БпЛА другого рівня літаючого сегмента, які є мобільними точками доступу, що дозволяють підвищити точність позиціонування.

Ключові слова: БпЛА, групи БпЛА, джерела радіовипромінювання спеціального призначення, координати об'єкта, літаючий сегмент, повітряний сегмент..

V. Saiko, G. Radzivilov, V. Komarov. Method and integrated complex for determining the location of terrestrial sources of radio radiation based on special-purpose UAVs

The innovative solution belongs to the field of electronic communications and radio engineering, in particular, to methods of positioning a radio emission source (REF), namely, to methods of determining the location of radiation sources in a hostile environment and can be used in navigation, direction finding, and location tools when solving the problem of covert determination of the coordinates of radio emission sources, in particular, determining the coordinates of REF from the board of an aircraft (aircraft). Increasing the efficiency of the use of the integration complex for determining the location of ground-based radio emission sources of special purpose in comparison with known solutions occurs due to the additional introduction into the portable multifunctional means of determining the location of a radio emission source of the ground segment of an intelligent sensor (sensor) of the electromagnetic environment, an infrastructure management system for monitoring territories by groups of aircraft. At the same time, the infrastructure for monitoring territories by groups of flying vehicles is made in the form of interconnected groups of UAVs, which constitute the second level of the flying segment and are mobile access points, and interconnected groups of main UAVs, which constitute the first level of the flying segment, which relay received/transmitted data to the mobile communication base station, which operates in the normal mode. The innovative solution ensures increased efficiency of the functioning of the infrastructure of the integrated complex for determining the location of ground-based radio radiation sources of special purpose in conditions where the enemy uses ground-based radiation sources with directional antennas and operating at low power, by jointly using data from the arrays of primary measurements of a portable multifunctional means for determining the location of a ground-based radio radiation source and the changes of groups of UAVs of the second level of the flying segment, which are mobile access points, which allow to increase the accuracy of positioning.

Keywords: UAVs, UAV groups, special-purpose radio emission sources, object coordinates.

Постановка завдання у загальному вигляді

В умовах бойових дій ефективність застосування існуючої наземної мобільної техніки радіоконтролю з обмеженою висотою розміщення їх антенних пристроїв суттєво зменшується, а традиційне використання наземних багатопозиційних систем місцезнаходження стає практично непрацездатним, оскільки в умовах використання «малопотужних» наземних ДРВ зі спрямованими антенами та обмеженого часу випромінювання радіосигналів ймовірність одночасної електромагнітної доступності наземних ДРВ до кількох (не менше двох) пунктів прийому багатопозиційних систем визначення місцезнаходження стає вкрай низькою. Через це актуальною є розробка способів визначення джерел випромінювання з використанням БпЛА, які дозволяють істотно збільшити зону покриття з виявленням і визначенням координат ДРВ.

Аналіз публікацій за темою досліджень

Відомий комплекс визначення місцезнаходження наземних ДРВ, який включає прийом сигналів у заданій смузі частот вимірювачем, що переміщується в просторі, вимірювання первинних координатно-інформаційних параметрів виявлених сигналів, в якості яких використовується рівень оцінюваних сигналів, з одночасним вимірюванням і запам'ятовуванням вторинних параметрів [1]. Таке технічне рішення дозволяє скоротити часові витрати на визначення координат ДРВ в умовах, коли накладаються обмеження на габаритні розміри пеленгаторної антени.

Недоліком рішення є відносно низька точність визначення координат ДРВ. Це обумовлено тим, що під час вимірювання параметрів радіосигналу не враховуються його поляризаційні параметри, а для досягнення прийнятної точності визначення координат потрібно додаткове коригування маршруту польоту ЛА, що потребує тривалого електромагнітного контакту з ДРВ.

Відомий також комплекс визначення координат ДРВ при амплітудно-фазовій пеленгації з борту ЛА, який включає прийом радіосигналів бортовою антеною, частотну селекцію, визначення пеленгів, реєстрацію та обробку отриманих даних [2]. Координати ДРВ фіксуються як точка перетину принаймні двох ліній пеленгів. Спосіб дозволяє при його реалізації поєднувати процес визначення координат ДРВ з іншими процесами радіомоніторингу: параметричним та семантичним контролем сигналів.

Недоліком цього рішення є відносно низька точність визначення координат ДРВ. Це пояснюється насамперед виникненням помилок, пов'язаних із випадковими флуктуаціями просторового положення площини пеленгаторної антени під час польоту ЛА. Величину цих помилок можна порівняти із систематичними та експлуатаційними помилками використовуваних при реалізації апаратних засобів.

Відомий також комплекс визначення координат ДРВ при амплітудно-фазовій пеленгації з борту ЛА, який включає прийом радіосигналів бортовою пеленгаторною антеною, частотну селекцію, визначення ліній пеленгів, реєстрацію та вагову обробку отриманих даних [3]. Лінії пеленгів визначають у площині пеленгаторної антени, а за результатами вагової обробки формують допоміжні площини, ортогональні площини пеленгаторної антени і через кожну отриману лінію пеленгу.

Недоліком рішення є відносно невисока точність визначення координат ДРВ, так як під час вимірювання параметрів радіосигналу не враховуються його поляризаційні параметри, а також виникає необхідність використання антенних систем з елементами, що рознесені в просторі, що в більшості випадків неможливо через обмежені габарити ЛА.

Відомий комплекс визначення координат ДРВ, до складу якого входить об'ємна бортова пеленгаторна антенна решітка, що являє собою сукупність двох плоских антенних решіток, розташованих у паралельних або площинах, що перетинаються, що забезпечує можливість підвищення точності радіопеленгування в азимутальній і кутomisній

площинах [4]. Наземна компонента включає наземну апаратуру керування вертольотом та бортовим радіопеленгатором із пристроями керування та відображення у вигляді ноутбуків, а також контейнери для транспортування цільового навантаження.

Недоліком цього комплексу є відносно низька точність визначення координат ДРВ. Це пояснюється насамперед виникненням помилок, пов'язаних із випадковими флуктуаціями просторового положення площини пеленгаторної антени під час польоту ЛА. Крім того, громіскість антенних конструкцій на ЛА вертолїтного типу обумовлюють низьку експлуатаційну надійність комплексу.

Найбільш близьким технічним рішенням, як по суті, так і за задачею, що вирішується, яке обрано за найближчий аналог (прототип), є портативний багатофункціональний засіб визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента (як варіант конструктивного виконання), що містить пеленгаційну систему, яка складається з антенної системи для радіомоніторингу та пеленгування, цифрового радіоприймального пристрою, блоку аналого-цифрової обробки сигналів, системи передачі даних, що складається із радіомодема та антени радіомодема, системи картографії і навігації, що складається із пристрою картографії і навігації та антени картографії і навігації, персонального комп'ютера [5].

До недоліків такого інтегрованого комплексу визначення місцезнаходження ДРВ відноситься те, що його функціональні можливості істотно залежать від висоти розміщення антенних пристроїв над землею поверхнею, що визначає дальність їхньої дії та робочу зону. Широкомасштабне використання на сьогодні військовими формуваннями рф завадозахищених наземних радіозасобів для управління силами і засобами під час ведення бойових дій, що функціонують у різних діапазонах частот при знижених потужностях і з використанням спрямованих антен, призводить до істотного зменшення ймовірності їх своєчасного виявлення і просторової локалізації (визначення місця розташування) наземними засобами радіоконтролю. Крім того, в умовах реального рельєфу місцевості робоча зона та ефективність застосування існуючої наземної мобільної техніки радіоконтролю з обмеженою висотою розміщення їх антенних пристроїв суттєво зменшуються.

Постановка завдання

Метою статті є розробка способу та інтегрованого рішення для забезпечення підвищення ефективності функціонування інфраструктури інтеграційного комплексу визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення в умовах використання противником наземних джерел випромінювання із спрямованими антенами та які працюють на низьких потужностях.

Виклад основного матеріалу

1. Технічні аспекти інноваційного рішення

В основу інноваційного рішення покладено задачу шляхом додаткового введення до складу портативного багатофункціонального засобу визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента інтелектуального датчика (сенсора) електромагнітної обстановки, який підключається на вихід персонального комп'ютера та складається із N каналної системи збору даних та узгодження сигналів, драйвера системи збору даних, оперативного запам'ятовуючого пристрою, пристрою обробки сигналів, що складається зі статистичного процесора та нейронної мережі прямої передачі, системи управління інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА. При цьому інфраструктура моніторингу територій угрупованнями ЛА виконана у вигляді з'єднаних між собою груп БпЛА, які складають другий рівень літаючого сегмента та є мобільними точками доступу, та з'єднаних між собою груп головних БпЛА, що складають перший рівень літаючого сегмента та здійснюють ретрансляцію прийнятих/переданих даних до базової станції мобільного зв'язку, яка функціонує в штатному режимі. Таке інноваційне рішення забезпечує підвищення

ефективності функціонування інфраструктури інтегрованого комплексу визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення в умовах використання противником наземних джерел випромінювання зі спрямованими антенами та які працюють на низьких потужностях, шляхом спільного використання даних масивів первинних вимірювань портативного багатофункціонального засобу визначення місцезнаходження ДРА наземного сегмента та вимірювань груп БпЛА другого рівня літаючого сегмента, які є мобільними точками доступу, що дозволяють підвищити точність позиціонування.

Ключовою відмінністю цього рішення від традиційних сучасних рішень, які використовуються на інтегрованих комплексах визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення, є використання роїв БпЛА/дронів для підняття сенсорів над землею, що поліпшує ефективність виявлення та контролю за ДРВ. Дрони дозволяють підняти сенсори на висоту, не вдаючись до розгортання важких конструкцій баштового типу, використання яких обмежене легкістю їх виявлення та мобільністю. Висока швидкість розгортання запропонованих радіорозвідувальних комплексів дозволить використовувати їх ближче до лінії зіткнення та матиме краще маскування екіпажів. В умовах, коли ворожі джерела використовують спрямовані антени та працюють на низьких потужностях, ускладнюючи їх виявлення, це стає великою перевагою, адже дозволить виявляти позиції екіпажів ворожих БпЛА під час їх безпосередньої роботи.

Особливість інноваційного рішення в інтегрованому комплексі визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення полягає у наступному:

по-перше, запропоноване рішення має портативний багатофункціональний засіб визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента, що містить пеленгаційну систему, яка складається з антенної системи для радіомоніторингу та пеленгування, цифрового радіоприймального пристрою, блоку аналого-цифрової обробки сигналів, системи передачі даних, що в свою чергу складається із радіомодема та антени радіомодема, системи картографії і навігації, що також складається із пристрою картографії і навігації та антени картографії і навігації, персонального комп'ютера, системи живлення;

по-друге, до складу комплексу додатково введено інтелектуальний датчик (сенсор) електромагнітної обстановки, який підключається на вихід персонального комп'ютера та складається із N каналної системи збору даних та узгодження сигналів, драйвера системи збору даних, оперативного запам'ятовуючого пристрою, пристрою обробки сигналів, що складається зі статистичного процесора та нейронної мережі прямої передачі, системи управління інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА;

по-третє, інфраструктура моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента виконана у вигляді з'єднаних між собою груп БпЛА, які складають другий рівень літаючого сегмента та є мобільними точками доступу, та з'єднаних між собою груп головних БпЛА, що складають перший рівень літаючого сегмента та здійснюють ретрансляцію прийнятих/переданих даних до базової станції мобільного зв'язку, яка функціонує в штатному режимі;

по-четверте, інфраструктура моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента розділена на два рівні. Перший рівень складається з головних БпЛА, а другий рівень – із членів БпЛА у кожній групі (див. рис. 1).

Зв'язок між членами БпЛА у групі першого рівня та між членами БпЛА та головним БпЛА у групі другого рівня здійснюється на базі стандарту IEEE 802.11p, який був розроблений для бездротової передачі інформації між транспортними засобами з підтримкою самоорганізації. Зв'язок між головними БпЛА у різних групах виконується за допомогою технології IEEE 802.11p* у розширеному режимі, яка може забезпечувати передачу даних на дальність до 740 м [6].

Технічний результат в інтегрованому комплексі визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення полягає в підвищенні надійності та ефективності в умовах сучасних військових конфліктів, де точність та оперативність грають критичну роль в успішному веденні бойових операцій.

Зазначений результат досягається тим, що у зазначеному комплексі використовується інфраструктура інтегрованого рішення на базі портативного багатофункціонального засобу визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента, мережі БпЛА літаючого сегмента, засобів інфраструктури існуючої мобільної мережі.

За цих обставин БпЛА можуть забезпечити більш широкий обхват робочої зони та забезпечити можливість ефективного виявлення ворожих ДРВ в умовах реального рельєфу місцевості. Передбачено об'єднання БпЛА, обладнаних сенсорами, в єдину мережу для отримання точних даних шляхом комплексування даних. Цей спосіб дозволяє взаємодіяти декільком БпЛА, які одночасно піднімають сенсори над землею, та створює можливість визначення точного місцезнаходження ДРВ за допомогою аналізу сигналів із різних точок. Запропоноване рішення покликане розширити можливості систем автоматизованого ведення бою, поліпшуючи виявлення, контроль та ефективність у воєнних умовах. Подальший розвиток таких інновацій може підвищити загальну ефективність та військовий потенціал, забезпечуючи безпеку та захист національних інтересів.

II. Побудова інтегрованого комплексу визначення місцезнаходження наземних ДРВ на базі БпЛА спеціального призначення

Суть інноваційного рішення в інтеграційному комплексі визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення пояснюється кресленнями, де:

на рисунку 1 зображено інтегровану структуру автоматизованого комплексу визначення місцезнаходження наземних ДРВ для рішення задач силами спеціального призначення;

на рисунку 2 зображено структурну схему портативного багатофункціонального засобу визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента;

на рисунку 3 зображено структурну схему інтелектуального сенсора на базі ПЛІС для оцінки електромагнітної обстановки у реальному часі;

на рисунку 4 зображено функціональну схему комплексування вимірювань портативним багатофункціональним засобом визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента та інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента;

на рисунку 5 зображено графіки залежності щільності ймовірності та гістограма помилки визначення місцезнаходження при отриманні 40 сигналів.

Інтегрований комплекс визначення місцезнаходження ДРВ (як варіант конструктивного виконання) містить: наземний сегмент (1), до складу якого входить наземний портативний багатофункціональний засіб (2) визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента, інтелектуальний датчик (сенсор) електромагнітної обстановки (3), систему управління (4) інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА, командний пункт (5) керування комплексом, віддалену базову станцію (6), джерела радіовипромінювання (7), літаючий сегмент (8), до складу якого входить інфраструктура (9) моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента, що містить з'єднані між собою групи головних БпЛА (10)_{1...n}, інфраструктура (11) моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента, що містить також з'єднані між собою окремі групи (12)_{1...n} по 3–5 ЛА (див. блок-схему на рис. 1).

III. Спосіб визначення місцезнаходження наземних ДРВ на базі БпЛА спеціального призначення

В інтегрованому комплексі визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення здійснюють наступним чином з використанням рисунка 1 та рисунка 4, на яких позначено (див. рис. 1):

- 1 – наземний сегмент;
 2 – наземний портативний багатфункціональний засіб визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента;
 3 – інтелектуальний датчик (сенсор) електромагнітної обстановки;
 4 – система управління інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА;
 5 – командний пункт керування комплексом;
 6 – віддалена базова станція мобільного зв'язку;
 7 – джерела радіовипромінювання;
 8 – літаючий сегмент;
 9 – інфраструктура моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента першого рівня;
 10_{1...n} – групи головних БпЛА першого рівня;
 11 – інфраструктура моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента другого рівня;
 12_{1...n} – окремі групи по 3–5 ЛА другого рівня.

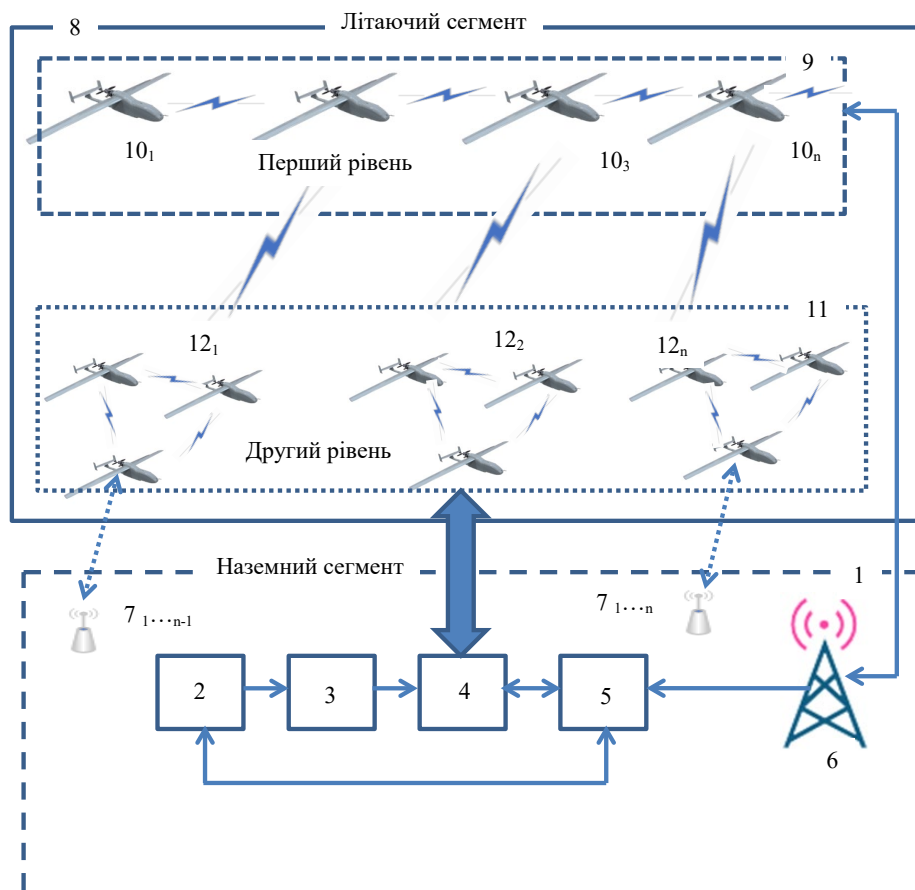


Рис. 1. Інтегрована структура автоматизованого комплексу визначення місцезнаходження наземних ДРВ для рішення задач силами спеціального призначення

На рисунку 2 позначено:

- 29 – виміряні значення RSSI наземним портативним багатфункціональним засобом визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента;
 30 – фіксовані відліки часу;
 31 – виміряні значення RSSI із груп БпЛА інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента;

- 32 – метод найближчих сусідів;
 33 – база даних радіокарти;
 34 – передача даних до командного пункту;
 35 – координати радіоелектронних засобів (РЕЗ) по радіокарті;
 36 – фільтр Калмана;
 37 – координати РЕЗ по даних груп БпЛА;
 38 – визначення місцезнаходження РЕЗ;
 39 – підрахунок середньоквадратичної помилки.

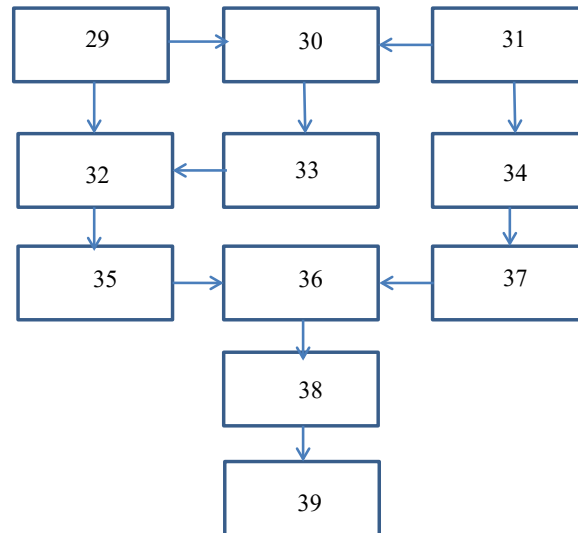


Рис. 2. Функціональна схема комплексування вимірювань портативним багатофункціональним засобом визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента та інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента

На першому етапі при зборі первинних даних формується база даних (БД) радіокарти RSSI (див. блок 33 рис. 2) на базі даних вимірювань місцезнаходження ДРВ наземним портативним багатофункціональним засобом 2 (див. рис. 1) наземного сегмента (див. блок 29 рис. 2) та групи БпЛА 11 другого рівня літаючого сегмента (див. рис. 1 та блок 31 рис. 2). Вимірювання збираються до таблиці БД, яка містить дані рівнів RSSI та звіти часу. Результати першого етапу є БД радіокарти (див. блок 33 рис. 2), що містить набір вимірювань RSSI портативного багатофункціонального засобу 2 (див. рис. 1) наземного сегмента та групи БпЛА другого рівня 11 літаючого сегмента для відповідних координат (див. рис. 1).

При цьому інфраструктура моніторингу територій угрупованнями ЛА літаючого сегмента виконана у вигляді з'єднаних між собою груп БпЛА, які складають другий рівень 11 літаючого сегмента та є мобільними точками доступу для ДРВ 7_{1...n} (див. рис. 1), та з'єднаних між собою груп головних БпЛА 10_{1...n}, що складають перший рівень 9 літаючого сегмента та здійснюють ретрансляцію прийнятих/переданих даних до базової станції 6 мобільного зв'язку (див. рис. 1), яка функціонує у штатному режимі.

Визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента портативним багатофункціональним засобом 2 (див. рис. 1) здійснюється класичним методом триангуляції [8]. Даний процес пояснюється таким чином з використанням рисунка 2, на якому позначено:

- 13 – пеленгаційна система;

- 14 – антенна система для радіомоніторингу та пеленгування;
- 15 – цифровий радіоприймальний пристрій;
- 16 – блок аналого-цифрової обробки сигналів;
- 17 – система передачі даних;
- 18 – антена радіомодема;
- 19 – радіомодем;
- 20 – система картографії і навігації;
- 21 – антена пристрою картографії і навігації;
- 22 – пристрій картографії і навігації;
- 23 – персональний комп'ютер;
- 24 – система живлення.

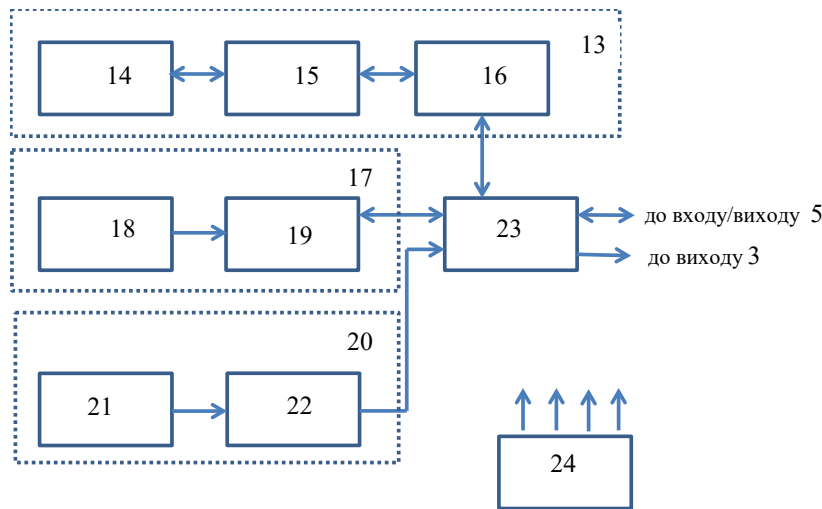


Рис. 2. Структурна схема портативного багатофункціонального засобу визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента

Отримані дані визначення координат (див. блок 35 рис. 4) використовуються для формування польотного завдання для груп БпЛА II другого рівня літаючого сегмента та одночасно використовуються при комплексуванні вимірювань портативним багатофункціональним засобом визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента та інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА другого рівня II літаючого сегмента (див. рис. 1).

Для оперативного оцінювання змін динамічних параметрів електромагнітної обстановки у реальному часі портативного багатофункціонального засобу 2 застосовується інтелектуальний датчик 3 (див. рис. 1). Структуру інтелектуального датчика 3 показано на рисунку 3, де:

- 25 – N канална система збору даних та узгодження сигналів;
- 26 – драйвер системи збору даних;
- 27 – оперативний запам'ятовуючий пристрій;
- 28 – пристрій обробки сигналів у складі статистичного процесора та нейронної мережі прямої передачі.

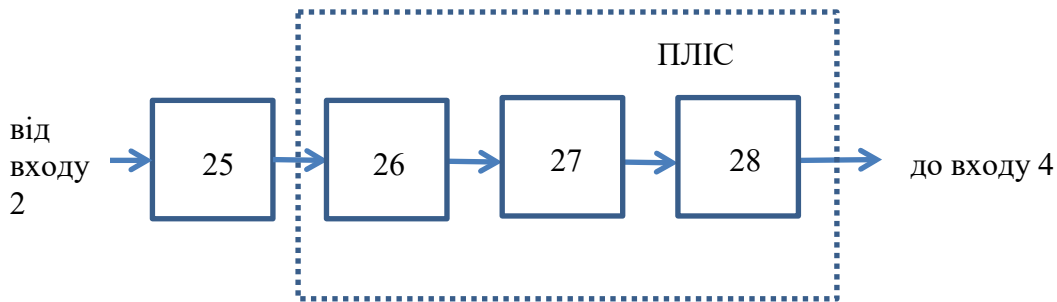


Рис. 3. Структурна схема інтелектуального сенсора на базі ПЛІС для оцінки електромагнітної обстановки у реальному часі

N канална система 25 збору даних та узгодження сигналів отримує сигнали з виходу персонального комп'ютера 23 (див. рис. 2). Обробка сигналів виконується за допомогою процесора, реалізованого на базі ПЛІС блоками 26, 27, 28 (див. рис. 3). Обмін інформацією ведеться через інтерфейс RS232, вбудований у ПЛІС. Дані вимірів відправляються на під'єднану систему управління 4 інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА 11 (див. рис. 1).

Крім того, виміряні значення RSSI даним способом використовуються при комплексуванні вимірювань портативним багатофункціональним засобом визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента та інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА другого рівня 11 літаючого сегмента (див. рис. 4) для забезпечення збільшення недостатньої частоти вимірювань RSSI і відповідно збільшення точності позиціонування джерел випромінювання $7_{1...n}$ (див. рис. 1).

Група БпЛА другого рівня 11 (див. рис. 1) спочатку здійснює первинну обробку інформації на борту БпЛА, а потім дані про виявлені ДРВ через групи головних БпЛА 9 (див. рис. 1), що складають перший рівень літаючого сегмента, ретранслюються до базової станції 6 мобільного зв'язку (див. рис. 1), яка функціонує у штатному режимі.

Далі дані по швидкодіючим каналам зв'язку передаються на наземний командний пункт 5 керування комплексом, де здійснюються вторинна обробка та відображення даних про розкриті радіоелектронну обстановку на тлі електронної карти місцевості (блок 20 на рис. 2). Для передачі з борту БпЛА більшого обсягу даних (даних про виявлені в широкому діапазоні частот ДРВ) застосовується апаратура передачі даних терагерцового діапазону.

Для цього до складу групи БпЛА першого та другого рівнів додатково введено приймально-передавальний модуль (радарний модуль TRX_024_06 [5]) терагерцового діапазону [7] у вигляді інтегральних мікросхем, що містять повністю прийомопередавач із вбудованою смужковою антенною решіткою, виконаний з можливістю вимірювання відстані та RSSI.

На другому етапі набори даних вимірів БД зіставляються з вимірами RSSI наземного портативного багатофункціонального засобу 2 визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента та групи БпЛА 11 другого рівня, вибираються відповідні координати методом найближчих сусідів (див. блок 32 рис. 4). Проміжні результати оцінки координат кожним методом окремо комплексуються фільтром Калмана (див. блок 36 рис. 4) для підвищення точності позиціонування і компенсації випадкових викидів.

IV. Модель визначення місцезнаходження об'єкта випромінювання

Процес визначення місцезнаходження об'єкта випромінювання групою БпЛА другого рівня пояснюється таким чином.

Припускаючи, що джерело випромінювання знаходиться на землі ($z_0 = 0$), необхідно знайти координату розташування джерела випромінювання $(x_i, y_i, 0)$ та i -ю позицію групи

БПЛА другого рівня (x_i, y_i, z_i) при отриманні сигналу від джерела випромінювання. Якщо група БПЛА другого рівня отримує m сигналів від джерела випромінювання, координати точки визначення місцезнаходження повинні задовольняти рівнянням (1):

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1)^2 = (d_1)^2 \\ \dots \dots \dots \\ (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i)^2 = (d_i)^2 \\ \dots \dots \dots \\ (x_m - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2 + (z_m)^2 = (d_m)^2 \end{cases}, \quad (1)$$

де d_i – відстань від групи БПЛА другого рівня до джерела випромінювання.

У бездротовому радіоканалі 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, потужність кожного прийнятого радіосигналу вимірюють за допомогою показника рівня прийнятого сигналу (Received Signal Strength Indicator, RSSI) [8]. Відстань на базі показників RSSI, як правило, розраховується на основі моделі логарифмічної втрати потужності сигналу при поширенні в середовищі:

$$RSSI = A - 10 * n * \log(d/d_0) + X_\sigma, \quad (2)$$

де d – відстань від пристрою до передавача (м);

A – потужність сигналу пристрою, виміряна на одиничній відстані d_0 від пристрою (дБм);

n – коефіцієнт втрат потужності сигналу при поширенні в середовищі, показник пов'язаний із конкретною технологією бездротового зв'язку;

X_σ – гаусовий розподіл випадкової змінної з нульовим середнім значенням та дисперсією σ^2 .

Оскільки втрата потужності сигналу при поширенні в середовищі залежить від навколишнього середовища, для підвищення точності позиціонування в технічному рішенні необхідно оцінити параметри A , n перед розгортанням операції визначення місцезнаходження.

Отже, у кожній конкретній операції для визначення місцезнаходження джерела випромінювання, група БПЛА другого рівня здійснює попереднє калібрування, тобто показник RSSI розраховується, враховуючи відстань між групою БПЛА другого рівня 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 джерела випромінювання необхідно обчислити координати цього джерела випромінювання.

Даний процес пояснюється наступним чином.

Припустимо, що позиція джерела випромінювання $p(x_i, y_i, 0)$, а група БПЛА другого рівня отримує сигнал від джерела випромінювання в позиції $p_i(x_i, y_i, z_i)$. Відстань між цими двома точками розраховується з урахуванням похибки вимірювання, що встановлюється під час калібрування. З кожним отриманим сигналом із джерела випромінювання, відстань від нього до групи БПЛА другого рівня дорівнюватиме:

$$d(p_i, p_o) = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 + (z_o)^2} + \varepsilon. \quad (4)$$

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):

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

де m – кількість сигналів, що приймаються від несанкціонованого повітряного об'єкта.

Внаслідок мінімізації стає можливим обчислити координати джерела випромінювання та похибки (див. блоки 38 і 39 на рис. 4).

Таким чином, для оцінки можливості визначення місцезнаходження на основі сигналу, що приймається, в розробленій моделі враховується кількість сигналів, що приймаються, і помилки вимірювання. Результати моделювання показують, що помилка визначення місцезнаходження збільшується, коли збільшується помилка вимірювання відстані (див. рис. 5). Враховуючи отримані залежності, точність визначення місцезнаходження може бути досягнута шляхом підвищення якості вимірювання відстані та забезпечення виявлення більшої кількості сигналів [9–11].

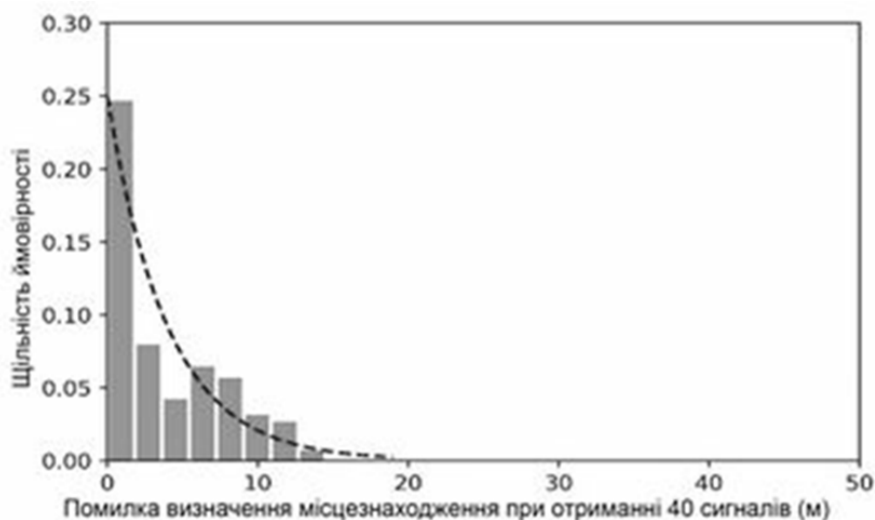


Рис. 5. Щільність ймовірності та гістограма помилки визначення місцезнаходження при отриманні 40 сигналів

Напрямки подальшої наукової роботи

Розробка комплексу моделей позиціонування з використанням БпЛА, що дозволяють візуалізувати процес обробки первинних вимірювань та оцінки координат дДРВ для різних топологій стаціонарних приймальних пунктів у складі наземного сегмента та траєкторій рухів приймальних пунктів на борту БпЛА у складі літаючого сегмента.

Висновки

1. Підвищення ефективності застосування інтеграційного комплексу визначення місцезнаходження наземних ДРВ спеціального призначення порівняно з прототипом полягає в тому, що шляхом введення додаткового введення до складу портативного багатофункціонального засобу визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента інтелектуального датчика (сенсора) електромагнітної обстановки, системи управління інфраструктурою моніторингу територій угрупованнями ЛА При цьому інфраструктура

моніторингу територій угрупованнями ЛА виконана у вигляді з'єднаних між собою груп БпЛА, які складають другий рівень літаючого сегмента та є мобільними точками доступу, та з'єднаних між собою груп головних БпЛА, що складають перший рівень літаючого сегмента та здійснюють ретрансляцію прийнятих/переданих даних до базової станції мобільного зв'язку, яка функціонує у штатному режимі, забезпечується підвищення надійності та ефективності в умовах сучасних військових конфліктів, де точність та оперативність грають критичну роль в успішному веденні бойових операцій.

2. Зазначений результат досягається тим, що у зазначеному інноваційному рішенні використовується інтегроване рішення на базі портативного багатофункціонального засобу визначення місцезнаходження ДРВ наземного сегмента, мережі БпЛА літаючого сегмента, засобів інфраструктури існуючої мобільної мережі. При цьому БпЛА можуть забезпечити більш широкий обхват робочої зони та забезпечити можливість ефективного виявлення ворожих ДРВ в умовах реального рельєфу місцевості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Патент 2510044 рф. Способ и устройство определения координат источников радиоизлучений. В. А. Заренков, Д. В. Заренков, В. И. Дикарев, А. С. Данилюк. Оpubл. 2006.
2. Патент 2275746 рф. Станция радиотехнической разведки. С. М. Вишняков, М. В. Куликов, А. Г. Митянин, П. Л. Смирнов, Д. В. Царик, О. В. Царик, А. М. Шепилов, А. Я. Шишков. Оpubл. 2012.
3. Патент 2432580 рф. Способ определения координат источника радиоизлучений при амплитудно-фазовой пеленгации с борта летательного аппарата. А. В. Вассенков, О. Б. Гузенко, А. С. Дикарев, В. А. Скобелкин. Оpubл. 2011.
4. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. 624 с.
5. Документація на TRX_024_006. URL: https://siliconradar.com/products/single-product/24-ghz-transceiver-trx_024_046/ (дата звернення: 13.04.2025).
6. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія / В. Г. Сайко та ін. К.: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
7. Безпроводові системи зв'язку терагерцового діапазону: монографія / В. Г. Сайко, Т. М. Наритник. Німеччина. Видавництво «LAP LAMBERT Academic Publishing RU», 2019. 68 с.
8. Слободянюк П. В., Наритник Т. М., Благодарний В. Г., Сайко В. Г., Булгач В. Л. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу: навч. посіб. К.: ДУІКТ, 2012. 596 с.
9. Сайко В. Г., Деркач А. П. Комплекс спеціального радіомоніторингу за радіоелектронними засобами з динамічною топологією для силових структур, який швидко розгортається на полі бою («Спеціальний моніторинг»). *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 125830* (УкрНОІВІ), 18 квітня 2024 року.
10. Сайко В. Г., Радзівілов Г. Д., Комаров В. О., Фомін М. М., Солодовник В. І., Криволапов Я. В., Криволапов Г. Я. Алгоритм визначення місцезнаходження несанкціонованого БПЛА за умов багатопроменевого поширення радіохвиль. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. Серія: технічні науки. Том 35 (74). 2024. № 1. С. 74–80.
11. Сайко В. Г., Романов Д. О., Радзівілов Г. Д., Комаров В. О., Фомін М. М. Метод визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль. *Збірник наукових праць ВІПІ. Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2024. Вип. 6. С. 204–214.