УДК 621.396.96

А. С. Карамушка, М. І. Карамушка, С. Г. Шило

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ ЗА РАХУНОК ОБ'ЄДНАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ВІД СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

Анотація. *Розглянуто проблему виявлення малорозмірних повітряних цілей радіолокаційною системою моніторингу повітряного простору. Проаналізовано переваги спільної обробки інформації від кількох радіолокаційних джерел та використання методу «супроводження до виявлення». Показано, що пропорційно збільшенню кількості джерел зростає навантаження на систему обробки, тому доцільно оптимізувати визначення мінімально необхідної кількості джерел для забезпечення потрібної якості інформації.*

Ключові слова: *радіолокаційна інформація, малорозмірна ціль, система джерел, об'єднання інформації, супроводження до виявлення.*

Annotation. *The problem of detecting small-sized air targets by a radar system for airspace monitoring is considered. The advantages of joint processing of information from several radar sources and of using the track-before-detect method are analyzed. It is shown that the load on the processing system grows in proportion to the number of sources; therefore, it is advisable to optimize the determination of the minimum required number of sources to ensure the required quality of information.*

Keywords: *radar information, small-sized target, system of sources, information fusion, track-before-detect.*

Досвід сучасної війни рф проти України свідчить, що найбільш значну частину повітряних загроз становлять малорозмірні повітряні об'єкти (ПО): ударні безпілотні літальні апарати (БпЛА) типу «Шахед», розвідувальні дрони, крилаті ракети. Такі цілі мають малу ефективну поверхню розсіювання (від 0,001 до 0,1 м²), порівняно невелику швидкість і летять на малих висотах. Через це одна радіолокаційна станція (РЛС) нерідко виявляє їх несвоєчасно або має суттєві провали в супроводженні траєкторій таких ПО. Відмітки від цілі з'являються не в кожному огляді, а траєкторії скидаються із супроводження, що унеможливлює протидію їм.

Найпростіший спосіб збільшити дальність виявлення зазначених ПО – підвищити енергетичний потенціал РЛС (потужність передавача, розміри антени). Проте цей шлях дорогий, потребує доопрацювання апаратури та робить радіолокаційну станцію помітнішою для засобів радіотехнічної протидії противника. Тому більш доцільним є підвищення ефективності саме системи обробки радіолокаційної інформації, яка є обов'язковим компонентом системи радіолокаційного виявлення.

Мета роботи – проаналізувати, які переваги дає об'єднання інформації від кількох радіолокаційних джерел для виявлення малорозмірних цілей та які обмеження воно накладає на засоби обробки радіолокаційної інформації.

Обробка радіолокаційної інформації традиційно поділяється на три етапи [1]. Первинна обробка – це виявлення сигналу цілі на фоні шумів і вимірювання її координат за один огляд. Вторинна обробка – побудова траєкторії цілі за відмітками однієї РЛС, отриманими за кілька оглядів. Третинна обробка – об'єднання відміток або траєкторій від кількох РЛС в єдину картину повітряної обстановки, яку отримує пункт управління [6, 9].

Об'єднання інформації від кількох джерел дає такі основні переваги.

По-перше, зростає ймовірність виявлення цілі. Ціль, яку нестійко виявляє і спостерігає одна РЛС через невдалий ракурс, закриття рельєфом або завади, може суттєво краще спостерігати інша РЛС системи, що розташована в іншій точці. У багатопозиційних системах, де приймальні позиції приймають сигнали, відбиті від цілі при опроміненні будь-якою передавальною позицією, енергія сигналів фактично складається, і сумарне відношення сигнал/шум стає суттєво більшим, ніж у кожної окремої РЛС [2].

По-друге, підвищується точність визначення координат. Кожна РЛС вимірює положення цілі зі своєю похибкою. Коли одну й ту саму величину вимірюють кілька разів незалежними засобами, випадкові похибки частково компенсуються, і об'єднана оцінка стає точнішою. Крім того, різнотипні джерела надають різну ознакову інформацію (державна належність, тип і клас

цілі), спільна обробка якої з координатною інформацією підвищує достовірність розпізнавання повітряних об’єктів [6, 9].

По-третє, підвищується живучість: вихід з ладу однієї РЛС не призводить до втрати даних про повітряну ціль.

Порівняння можливостей однієї РЛС і системи з кількох РЛС наведено в табл. 1. Таблиця 1 – Порівняння можливостей однієї РЛС і системи з кількох РЛС

Показник	**Одна РЛС**	**Кілька РЛС**
Ймовірність виявлення малорозмірної цілі	Обмежена ракурсом і рельєфом	Вища за рахунок різних точок огляду
Точність координат	Визначається однією РЛС	Вища за рахунок кількох вимірювань
Стійкість до завад і ураження	Низька	Висока
Обсяг інформації для обробки	Невеликий	Зростає зі збільшенням кількості РЛС
Вимоги до засобів автоматизації	Помірні	Високі

Додатково ефективність процесу виявлення цілей, що досліджуються, можна підвищити за допомогою методів «супроводження до виявлення» (Track-Before-Detect, TBD). Їх суть полягає в тому, що поріг виявлення на етапі первинної обробки свідомо знижують, а рішення про наявність цілі приймають не за одним оглядом, а за інформацією про траєкторію, накопиченою за кілька оглядів [3, 4]. Відмітки від справжньої цілі утворюють невипадковий потік, який можна описати потоком Бернуллі, і складаються в правдоподібну траєкторію, а хибні відмітки від шумів з’являються хаотично, відповідно до потоку Пуассона, і правдоподібних траєкторій не утворюють, тому відсіюються. Це дозволяє виявляти малорозмірні цілі на більших дальностях без збільшення складу апаратури РЛС.

Для реалізації TBD застосовують різні методи: динамічне програмування, перетворення Хафа, фільтр частинок. За якістю виявлення вони близькі, проте суттєво відрізняються за обчислювальними витратами: метод фільтра частинок працює значно швидше, ніж динамічне програмування, оскільки розраховує коефіцієнт правдоподібності для меншої кількості точок [3]. Тому для засобів автоматизації з обмеженими ресурсами вибір методу TBD є не менш важливим, ніж вибір кількості джерел.

Однак усі ці переваги мають свою ціну. Кожне нове джерело збільшує кількість відміток, які потрібно обробити за один огляд, а методи TBD додатково вимагають зберігати й обробляти інформацію за кілька оглядів. Найскладнішим етапом стає ототожнення – визначення того, які відмітки від різних РЛС належать одній і тій самій цілі. Кількість можливих варіантів ототожнення зростає дуже швидко при збільшенні кількості РЛС і цілей [5, 7, 8]. Якщо комплекс засобів автоматизації не встигає обробити інформацію за час одного огляду, дані про ціль запізнюються і втрачають цінність для бойового управління та цілевказання засобам ураження.

Наприклад, якщо кожна РЛС за один огляд видає 10 відміток, то при повному переборі для двох РЛС кількість можливих варіантів ототожнення перевищує сто, для трьох – тисячу, а для чотирьох – десять тисяч. Тобто кожна нова РЛС збільшує обсяг обчислень приблизно на порядок, тоді як виграш у ймовірності виявлення та точності визначення координат зростає значно повільніше.

Існують два основні варіанти побудови системи обробки. За централізованого варіанта на пункт управління передаються всі відмітки від усіх РЛС, що забезпечує найвищу якість об’єднання, але створює найбільше навантаження на засоби обробки та канали зв’язку. За децентралізованого варіанта кожна РЛС спочатку самостійно будує траєкторії, а на пункт управління передаються лише готові траєкторії. Це суттєво зменшує обсяг обчислень і переданої інформації, хоча частина корисної інформації при цьому втрачається [7].

Для зменшення обчислювального навантаження доцільно застосовувати такі заходи: обмежувати пошук відміток шляхом стробування зон простору навколо очікуваного місцеположення цілі; спочатку будувати траєкторії окремо за інформацією кожної РЛС, а потім об’єднувати вже готові траєкторії; використовувати паралельні обчислення на сучасних багатоядерних процесорах.

Таким чином, об’єднання інформації від кількох радіолокаційних джерел є ефективним шляхом підвищення ймовірності та дальності виявлення малорозмірних повітряних цілей і точності визначення їх координат. Водночас зі збільшенням кількості джерел швидко зростає навантаження на засоби обробки радіолокаційної інформації. Тому для кожної системи існує раціональна кількість джерел, при якій виграш у якості виявлення досягається без втрати оперативності обробки. Її визначення з урахуванням щільності повітряної обстановки, обраного методу обробки та продуктивності комплексів засобів автоматизації є напрямом подальших досліджень.

Список використаних джерел:

1. Skolnik M. I. Radar Handbook. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2008. 1352 p.
494 p. 2. Willis N. J., Griffiths H. D. Advances in Bistatic Radar. Raleigh : SciTech Publishing, 2007.

3. Davey S. J., Rutten M. G., Cheung B. A comparison of detection performance for several track-before-detect algorithms // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2008. Article ID 428036. 10 p.

4. Неуймін О. С., Жук С. Я. Виявлення цілі в імпульсно-доплерівській РЛС на основі багатоглядового накопичення сигналів // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2013. № 53. С. 89–97.

5. Blackman S. Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2004. Vol. 19, No. 1. P. 5–18.

6. Шило С., Стасєв Ю., Першин О., Шульга В., Яцун Д., Сокоринський Ю. Метод сумісного об’єднання координатної та ознакової інформації про повітряні об’єкти від системи різнотипних джерел з урахуванням особливостей їх функціонування // Випробування та сертифікація. 2026. № 2(12). С. 86–94.

7. Bar-Shalom Y., Willett P. K., Tian X. Tracking and Data Fusion: A Handbook of Algorithms. Storrs : YBS Publishing, 2011. 1250 p.

8. Yang K., Danino M., Bar-Shalom Y. Target selection in a multitrack environment // Proc. SPIE 11423, Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXIX. 2020.

9. Shylo S. H., Golovnyak D. V., Khmelevsky S. I., Timochko O. O. Method of joint processing of coordinate and attribute information in special-purpose radar information processing systems // Control, Navigation and Communication Systems. 2019. Issue 6. P. 123–128.

Карамушка Ангеліна Сергіївна – курсант Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: storchaevaa1999@gmail.com

Карамушка Микита Ігорович – курсант Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: nikita1karamushka@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0009-0004-1098-9366

Шило Сергій Георгійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри № 401 Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: shilosg@i.ua, ORCID https://orcid.org/0000-0001-5782-552X

Anhelina Serhiivna Karamushka Cadet of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: storchaevaa1999@gmail.com

Mykyta Ihorovych Karamushka – Cadet of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: nikita1karamushka@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0009-0004-1098-9366

Serhii Heorhiiovych Shylo – PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department No. 401, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: shilosg@i.ua, ORCID https://orcid.org/0000-0001-5782-552X