І.М. Трофимов¹, І.В. Гурєєв¹, О.В. Пуховий²¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків²Національний університет оборони України ім. І. Черняхівського, Київ

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ КООПЕРАТИВНОГО ПРИЙОМУ ВІДБИТИХ СИГНАЛІВ

Розглядається підвищення достовірності радіолокаційної інформації в багатопозиційних радіолокаційних системах за рахунок використання кооперативного прийому відбитих сигналів. Підвищення достовірності радіолокаційної інформації досягається за рахунок усунення хибних вимірів в багатопозиційній радіолокаційній системі не за рахунок введення додаткових позицій, а за рахунок використання багатопозиційних методів визначення координат повітряних об'єктів. Використання багатопозиційних методів визначення координат повітряних об'єктів передбачає значне зменшення імовірності виникнення хибних вимірів без збільшення кількості позицій. Проведено порівняльний аналіз імовірності виникнення хибного виміру в даній системі при використанні кооперативного прийому відбитих сигналів та без нього.

Ключові слова: багатопозиційні радіолокаційні системи, сумарно-далекомірний метод визначення координат, хибні виміри.

Вступ

Постановка проблеми. Останні локальні конфлікти із залученням сучасних засобів повітряного нападу (ЗПН) характеризуються інтенсивним застосуванням протирадіолокаційних ракет (ПРР) та активним використанням засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) для придушення системи протиповітряної оборони (ППО). Вдосконаленню ПРР та оснащенню ними бойових літаків приділяється значна увага. Прикладами сучасних ПРР є: Х-31 ПД (країна-виробник Російська Федерація); HARM AGM-88, Шрайк (країна-виробник США); ALARM, ARMAT (країна-виробник Великобританія) [1–3]. Це приводить до зменшення живучості активних однопозиційних РЛС, які випромінюють сигнали великою потужністю, та обумовлює необхідність пошуку нових шляхів підвищення живучості та перешкодозахищеності РЛС. Одним із перспективних напрямків розвитку РЛС є перехід від однопозиційних РЛС до багатопозиційних радіолокаційних систем (БП РЛС), які складаються з рознесених у просторі передавальних та приймальних пунктів (або однопозиційних РЛС), що сумісно виконують радіолокаційне спостереження повітряних цілей.

Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та використання малих висот підвищує актуальність створення та підтримання суцільного маловисотного радіолокаційного поля (МВ РЛП). Традиційно, побудова МВ РЛП вирішувалась за рахунок розгортання додаткових радіотехнічних підрозділів, створення локальних ліній попередження,

застосування аеростатів.

Перспективним напрямом у вирішенні задачі створення суцільного МВ РЛП (з верхньою межею до 3 км та нижньою межею від 50–100 м) є використання малогабаритних автоматичних РЛС з дистанційним керуванням та невеликою дальністю дії (до 50 км), які об'єднуються у єдиний комплекс. У теперішній час вже відомі приклади таких автоматичних РЛС, де використовуються цифрові антенні решітки з електронним круговим скануванням: “Роса-РБ” (країна-виробник Білорусь), РЛС серії LSTAR (V)1/2/3 (AN/TPQ-51) (країна-виробник США). Зазначені РЛС знаходяться на озброєнні збройних сил відповідних країн [5; 15].

Таким чином, одним із перспективних напрямків розвитку радіолокаційних систем є перехід до багатопозиційної побудови шляхом об'єднання однопозиційних автономних активних РЛС в єдину БП РЛС, яка може працювати як в активному, так і в пасивному режимах [6–7].

При наявності обмежень на габарити антен і, як наслідок, великих похибках кутових вимірів, підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів (ПО) в БП РЛС може досягатися за рахунок використання багатопозиційних методів місцевизначення (наприклад, далекомірною) [8]. Але в умовах багатоцільової обстановки застосування далекомірною методу приводить до появи значної кількості хибних вимірів [6; 9–11].

Розглянемо двопозиційну систему, яка складається з рознесених у просторі активних РЛС зі слабонаправленими антенами (рис. 1). На рис. 1 шири-

на діаграми направленості антени (ДНА) ($\delta\theta$) визначає довжину сектору кільця дальності, а роздільна здатність по дальності (δR) визначає ширину сектору кільця дальності.

При використанні далекомірного методу для підвищення точності визначення координат та знаходженні в зоні огляду двох активних РЛС зі слабонаправленими антенами двох ПО, утворюється чотири сектора кілець дальностей. Тобто кожний ПО формує два сектора кілець дальності відносно двох РЛС. Місцезположення ПО в даній повітряній обстановці буде відповідати точкам перетинів цих кілець дальностей. Отже утворюється чотири точки перетину (рис. 1), з яких дві відповідають дійсному положенню ПО (позначені точками), інші дві відповідають хибним положенням ПО (позначені кільцями).

Рис. 1. Пояснення появи хибних вимірів при використанні далекомірного методу місцевизначення

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 1 дійсні ПО зображені суцільними точками, а хибні обведені пунктирними лініями.

Таким чином, кожна приймально-передавальна позиція (автономна РЛС) створює n секторів кіл дальностей для n цілей. Для двопозиційної системи максимальна кількість перетинів буде дорівнювати n^2 , де n – кількість ПО, а кількість хибних вимірів буде складати $n^2 - n$ [9]. Загальним виразом для максимальної кількості хибних вимірів g для n виявлених ПО при N приймально-передавальних позиціях (автономних РЛС) є:

$$g = (n^2 - n)(N^2 - N) / 2. \quad (1)$$

В роботі [9] показано, що існує також інший випадок появи хибного виміру. Наприклад, у випадку, коли в приймальному пристрої РЛС в прийнятій реалізації викид шуму при відсутності цілі перевищує поріг виявлення. Тобто шумовий викид призводить до появи хибної тривоги F . При використанні далекомірного методу визначення координат ПО в РЛС зі слабонаправленою антеною, поява хибної тривоги створює хибний сектор кола дальності. При перетині хибного сектору кола з істинною виникає хибний перетин (хибний вимір).

Виникає потреба у пошуку шляхів усунення хибних вимірів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Відомим методом підвищення достовірності в активних БП РЛС при застосуванні далекомірного методу визначення координат ПО є використання надмірності вимірів. У відомих роботах використовується принцип надмірності вимірів, який реалізується за рахунок введення додаткових приймально-передавальних позицій та використання критерію “ k із n ”, де “ k ” – кількість перетинів кіл дальностей в точці, що аналізується, “ n ” – кількість приймально-передавальних позицій [6; 9; 11].

Недоліком даного методу є необхідність збільшення кількості приймально-передавальних позицій пропорційно кількості ПО, які знаходяться в зоні огляду БП РЛС. В умовах багатоцільової обстановки даний метод є важкоореалізуємым.

В роботі [4] розглядається підвищення достовірності в БП РЛС вже не за рахунок збільшення кількості позицій, а за рахунок об’єднання методів визначення координат в БП РЛС, а саме: далекомірного та різницево-далекомірного. Недоліком даного методу є складність об’єднання різних методів радіолокаційного спостереження, а саме: активного та пасивного. Також в даній роботі не сказано, за рахунок чого буде здійснено об’єднання даних методів.

Мета статті – підвищення достовірності радіолокаційної інформації в багатопозиційних радіолокаційних системах за рахунок використання кооперативного прийому відбитих сигналів в умовах багатоцільової обстановки та обмеження на кількість приймально-передавальних позицій.

Виклад основного матеріалу

Реалізація в БП РЛС кооперативного прийому відбитих сигналів та використання ортогональних зондувальних сигналів створює умови для усунення хибних вимірів за рахунок ускладнення обробки сигналів, що приймаються, без введення додаткових приймально-передавальних позицій. Використання ортогональних зондуючих сигналів забезпечує можливість ідентифікації передавальної позиції по прийнятому ехо-сигналу та реалізації сумарно-далекомірного методу в БП РЛС. Ортогональність зондуючих сигналів може забезпечуватися як частотним, так і кодовим способом.

Виконання в БП РЛС наведених вище умов забезпечує можливість усунення хибних вимірів за рахунок поєднання далекомірного та сумарно-далекомірного методів визначення координат ПО.

Розглянемо випадок, коли в зоні спостереження двопозиційної радіолокаційної системи знаходяться два ПО. При поєднанні далекомірного та сумарно-далекомірного методів визначення координат ПО створюються чотири сектора кілець дальностей і два сектора сумарно-далекомірного овалу. В цьому випадку реалізація сумарно-далекомірного методу

забезпечує надмірність вимірювань, яка може бути використана для усунення хибних вимірів місцеположення ПО (рис. 2).

Проведемо оцінку кількісних характеристик

методу усунення хибних вимірів. В якості кількісної характеристики усунення хибних вимірів доцільно використовувати імовірність появи хибних вимірів в БП РЛС [9].

Рис. 2. Усунення хибних вимірів за рахунок введення додаткового каналу прийому сигналів
Джерело: розроблено авторами.

Імовірність появи хибних вимірів розраховується за виразом:

$$P_{FA} = \sum_{i=k}^n C_n^k P_{fa}^k (1 - P_{fa})^{n-k}, \quad (2)$$

де P_{FA} – імовірність того, що розглядаємий перетин є хибним відносно БП РЛС;

C_n^k – біноміальний коефіцієнт;

n – кількість РЛС, які входять в состав активної БП РЛС;

k – критерій виявлення (кількість перетинів в одній точці);

P_{fa} – імовірність того, що розглядаємий перетин є хибним відносно однієї РЛС.

Біноміальний коефіцієнт розраховується за виразом [12–13]:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad (3)$$

При $n = k$ біноміальний коефіцієнт становить 1. Імовірність P_{fa} розраховується за виразом [9; 12–13]:

$$P_{fa} = P_n + P_e P_d (1 - P_n), \quad (4)$$

де P_n – імовірність перевищення порогу виявлення хибним викидом;

P_d – імовірність правильного виявлення;

P_e – імовірність знаходження в одному секторі кола дальності однієї та більше цілей (рис. 4).

З урахуванням того, що значення P_n , які використовуються в радіолокації ($P_n = 10^{-6} \div 10^{-8}$) є достатньо малим, то вираз (4) буде мати наступний вид:

$$P_{fa} = P_e P_d. \quad (5)$$

Імовірність P_e розраховується за виразом [9; 12–13]:

$$P_e = n / N_{ci}, \quad (6)$$

де n – кількість повітряних цілей, які знаходяться в зоні огляду РЛС;

N_{ci} – кількість суміжних секторів кіл дальностей розраховується за виразом [12]:

$$N_{ci} = R_{\max} / \delta R, \quad (7)$$

де $R_{\max}$ – максимальна дальність виявлення ПО;

δR – ширина сектору кола дальності;

$i = 1, 2, \dots, k$ – кількість секторів кіл дальностей (рис. 3).

Рис. 3. Сектор повітряного простору, в якому ведеться радіолокаційна розвідка ПО відносно однієї РЛС

Джерело: розроблено авторами.

Вираз (7) відповідає випадку використання не-направлених антен в приймально-передавальних позиціях БП РЛС. При використанні направлених антен кількість хибних вимірів зменшується. Вони утворюються тільки на перехресті променів, які одночасно опромінюють ПО. Але при знаходженні ПО один відносно другого на значній відстані місця утворення хибних вимірів можуть виходити за межі променів. В такому випадку хибні виміри не утворюються. Знайдемо залежність значення відстані між місцями утворення хибних вимірів від значення

відстані між ПО. Відстані між місцями утворення двох хибних вимірів в декартовій системі координат визначається виразом (рис. 4) [13].

$$\Delta r_{fa} = \sqrt{(g_{X1} - g_{X2})^2 + (g_{Y1} - g_{Y2})^2}, \quad (8)$$

де Δr_{fa} – відстань між місцями утворення хибних вимірів;

$g_{X1}, g_{X2}, g_{Y1}, g_{Y2}$ – координати місць утворення хибних вимірів в декартовій системі координат.

Рис. 4. Поява хибних вимірів:
а – в межах перетину двох променів;
б – за межами променів
Джерело: розроблено авторами.

Місця утворення хибних вимірів визначаються точками перетинів двох кіл із центрами в точках розташування РЛС. Координати місця утворення хибних вимірів визначаються виразами [13–14]:

$$g_{X1} = \frac{R_{11}^2 - R_{21}^2 + l^2}{2l}; \quad (9)$$

$$g_{X2} = \frac{R_{12}^2 - R_{22}^2 + l^2}{2l}; \quad (10)$$

$$g_{Y1} = \frac{1}{2l} \sqrt{2l^2(R_{11}^2 + R_{21}^2) - (R_{11}^2 - R_{21}^2)^2 - l^4}; \quad (11)$$

$$g_{Y2} = \frac{1}{2l} \sqrt{2l^2(R_{12}^2 + R_{22}^2) - (R_{12}^2 - R_{22}^2)^2 - l^4}; \quad (12)$$

де $R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}$ – відстані від РЛС1 та РЛС2 до першого та другого хибного виміру;

l – відстань між РЛС 1 та РЛС 2 (база).

Співвідношення значень ширини ДНА (Θ), ма-

ксимальної відстаней між ПО $R_{\max}$, роздільної здатності δR впливають на значення імовірності P_e та P_{fa} . Для значень $\delta R = 250$ м, $R_{\max} = 10$ км, $\Theta = 30^\circ$, значення P_e буде знаходитися в діапазоні $P_e = 0,025 \dots 0,5$, а значення $P_{fa} = 0,023 \dots 0,45$.

З урахуванням зазначених факторів за виразом (2) розрахована імовірність появи хибних вимірів P_{FA} , при використанні відомого (за рахунок введення додаткової РЛС) та запропонованого (за рахунок введення додаткового приймального каналу) методів усунення хибних вимірів для різної кількості ПО, які знаходяться в зоні виявлення БП РЛС. Результати розрахунків наведено на рис. 5 для випадку двопозиційної (рис. 5, а) та трипозиційної (рис. 5, б) радіолокаційних систем, де крива P_{FA1} відповідає використанню відомого методу, а крива P_{FA2} відповідає використанню запропонованого методу усунення хибних вимірів.

Рис. 5. Залежність імовірності появи хибних вимірів в БП РЛС від кількості ПО в зоні виявлення при використанні відомого (P_{FA1}) та запропонованого (P_{FA2}) методу усунення хибних вимірів в БП РЛС:
а – дві приймально-передавальні позиції;
б – три приймально-передавальні позиції
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 5 видно, що використання запропонованого методу усунення хибних вимірів забезпечує зменшення імовірності виникнення хибних вимірів без використання додаткових приймально-

передавальних позицій, що, в свою чергу, підвищує достовірність радіолокаційної інформації. Результати статистичного моделювання використання запропонованого методу усунення хибних вимірів в двопозиційній радіолокаційній системі наведено на рис. 6. Таким чином, результати математичного розрахунку та проведеного статистичного моделювання підтверджують можливість використання запропо-

нованого методу для усунення хибних вимірів в БП РЛС за рахунок реалізації кооперативного прийому ехо-сигналів, а не за рахунок збільшення кількості приймальних позицій. В залежності від конфігурації БП РЛС та кількості ПО, які знаходяться в зоні виявлення БП РЛС, використання запропонованого методу забезпечує зменшення імовірності виникнення хибних вимірів від 2 разів та більше.

Рис. 6. Результати статистичного моделювання в двопозиційній БП РЛС: а – використання далекомірного методу; б – сумісне використання далекомірного та сумарно-далекомірного методів
Джерело: розроблено авторами.

Висновки

Підвищення достовірності радіолокаційної інформації за рахунок використання кооперативного прийому відбитих сигналів в умовах багатоцільової обстановки забезпечує зменшення імовірності виникнення хибних вимірів без використання додаткових приймально-передавальних позицій. Усунення хибних вимірів здійснюється за рахунок надмірності вимірів та використанню критерію “ k із n ”. Надмірність вимірів забезпечується реалізацією сумарно-далекомірного методу без збільшення кількості приймально-передавальних позицій. Для випадку

трьохпозиційної БП РЛС використання запропонованого методу забезпечує зменшення імовірності виникнення хибних вимірів в 2 рази при наявності в зоні огляду 6 ПО. При розробці перспективних оглядових маловисотних автоматичних РЛС з електронним скануванням та використанням цифрових активних антенних решіток доцільно передбачити режими синхронізації апаратури просторово рознесених РЛС для утворення БП РЛС з кооперативним прийомом з метою підвищення живучості, перешкодозахищеності та підвищення якості радіолокаційної інформації.

Список літератури

1. AGM-88 HARM. *Military analysis network* : web site. URL: <http://man.fas.org/dod-101/sys/smart/agm-88.htm>.
2. Горчица Г., Локарев Л. Боевое применение противорадиолокационных ракет класса “воздух-земля”. *Виртуальный авиационный справочник* : web site. URL: <http://airwar.ru/other/article/bpprr.html>.
3. Raytheon AGM-88 HARM : web site. URL: <http://www.designation-systems.net/dusrm/m-88.html>.
4. Шишанов С. В. Способ устранения неоднозначности измерения координат в многоцелевой обстановке для многопозиционной сверхширокополосной РЛС. *Известия вузов России*. 2016. № 5. С. 30-34.
5. Камалтинов Г. Г., Колесник О. М. Тенденції розвитку радіолокаційних засобів контролю повітряного простору. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2020. № 2(64). С. 89-95. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.64.13>
6. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. Москва : Радиотехника, 2007. 512 с.
7. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. Москва : Радио и связь, 1993. 416 с.
8. Сайбель А. Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. Москва : Оборонгиз, 1958. 55 с.
9. Nicholas J. Willis, Hugh D. Griffiths. *Advances in Bistatic Radar*. SciTech Publishing, 2007. 485 p. <https://doi.org/10.1049/SBRA001E>.
10. Борисов Е. Г., Степанов М. Г. Кооперативная обработка координатной информации в двухпозиционной радиолокационной системе. *Вопросы радиоэлектроники*. 2012. № 1. С. 58-65.
11. Скольник М. Справочник по радиолокации. Москва : Сов. радио, 1978. 375 с.
12. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. Москва : Радио и связь, 1982. 624 с.

13. Корн Г. Справочник по математике. Москва : Наука, 1977. 832 с.
14. Fewell M. P. Area of common overlap of three circles. Australia : Maritime operations divisions defense science and technology organization, 2006. 23 p.
15. Бела́він О. В. Климченко В. Й., Камалтинов Г. Г., Маляренко О. С. Світові тенденції розвитку радіолокаційних засобів контролю повітряного простору. *Наука і оборона*. 2015. № 1. С. 48-53.

Надійшла до редколегії 04.10.2021

Схвалена до друку 16.11.2021

Відомості про авторів:

Трофимов Іван Миколайович

кандидат технічних наук
начальник науково-дослідного відділу
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7080-909X>

Гурєв Іван Володимирович

ад'юнк
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4974-1040>

Пуховий Олександр Володимирович

кандидат військових наук доцент
начальник кафедри Національного університету
оборони України ім. І. Черняхівського,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2863-3374>

Information about the authors:

Ivan Trofymov

PhD in Engineering
Head of Scientific Research Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7080-909X>

Ivan Hurieiev

Post-Graduate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4974-1040>

Oleksandr Pukhovyi

PhD in Military Science Associate Professor
Head of the Department of National Defence University
of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2863-3374>

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КООПЕРАТИВНОГО ПРИЕМА ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

И.Н. Трофимов, И.В. Гуреев, А.В. Пуховой

Рассматривается повышение достоверности радиолокационной информации в многопозиционных радиолокационных системах за счет использования кооперативного приема облученных сигналов. Данный метод позволяет осуществлять устранения ложных измерений в многопозиционных радиолокационных системах не за счет введения дополнительных позиций, а за счет введения дополнительного метода определения координат воздушных объектов. Использование данного метода устранения ложных измерений предусматривает значительное уменьшение вероятности возникновения ложных измерений без увеличения количества позиций. Проведен сравнительный анализ вероятности возникновения ложного измерения в данной системе при использовании дополнительного метода и без него.

Ключевые слова: многопозиционные радиолокационные системы, суммарно-дальномерный метод определения координат, ложные измерения.

RELIABILITY INCREASING OF RADAR INFORMATION IN MULTISTATIC RADARS DUE TO THE USING COOPERATIVE RECEPTION OF RETRANSMITTED SIGNALS

I. Trofymov, I. Hurieiev, O. Pukhovyi

One of the promising areas of development of radar systems is the transition to multi-position construction by combining single-position autonomous active radars into a single multistatic radar, which can operate in both active and passive modes. In the presence of restrictions on the dimensions of the antennas and, as a consequence, large errors of angular measurements, increasing the accuracy of determining the coordinates of air objects in the multistatic radar can be achieved through the use of multi-position methods (e.g. rangefinder). But in a multi-purpose environment, the application of the rangefinder method leads to a significant number of false measurements. Reliability increasing of radar information in multistatic radars due to the using cooperative reception of irradiated signals are considered. The implementation of this proposed method is possible due to using orthogonal (e.g. frequency) transmitted signals in multistatic radars. Removal method of false estimations in multistatic radars with cooperative retransmitted signals receipt is considered. The method is used not due to additional positions but due to additional method of estimating air objects coordinates. Removal of false measurements is carried out due to redundancy of measurements and use of criterion "k from n". Using this removal method of false estimations provides extensive decreasing of appearing false marks probability in comparison with existing methods. For the case of a three-position multistatic radar, the use of the proposed method reduces the probability of false measurements by 2 times in the presence of 6 air objects. Statistical analysis of appearing false mark probability in this system in using additional method and without it is made. When developing promising survey low-altitude automatic radars with electronic scanning and the use of digital active antenna arrays, it is advisable to provide modes of synchronization of spatially spaced radars for the formation of multistatic radars with cooperative reception to increase survivability, noise immunity and increase accuracy of air objects.

Keywords: multistatic radar systems, sum and range method in determination of position, false marks.