УДК 621.396

С.М. Ковалевський, В.О. Тютюннік, Г.В. Худов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ РОЗСІЯННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ОДНОПОЗИЦІЙНОМУ ТА РОЗНЕСЕНОМУ ПРИЙОМАХ СИГНАЛІВ В ОГЛЯДОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЯХ

В роботі проведено порівняльний аналіз ефективної поверхні розсіяння малорозмірних повітряних об'єктів при використанні однієї оглядової радіолокаційної станції та рознесеному прийомі сигналів двома оглядовими радіолокаційними станціями. Надано рекомендації щодо використання однопозиційної чи багатопозиційної радіолокаційної системи при виявленні повітряного об'єкту в залежності від кута прийому сигналів.

Ключові слова: *ефективна поверхня розсіяння, однопозиційна система, багатопозиційна система, прийом сигналів, радіолокаційна станція, повітряний об'єкт.*

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. У теперішній час використання моностатичних радіолокаційних станцій (РЛС) для виявлення малорозмірних та маловисотних об'єктів є малоефективним [1-3]. Використання декількох РЛС недоцільно завдяки їх достатньо високій складності та фінансовим витратам. Основною характеристикою малорозмірних об'єктів, яка ускладнює їх виявлення за допомогою оглядових РЛС радіотехнічних військ (РТВ), є мале значення ефективної поверхні розсіяння (ЕПР). Зменшення значення ЕПР малорозмірних літальних апаратах може досягатися не тільки за рахунок зменшення розмірів планера, а також за рахунок використання композитних матеріалів та технологій «Стелс» [1 – 3].

Мета статті – об'єднання методів однопозиційного та рознесеного прийому сигналів при виявлені малорозмірних повітряних об'єктів в оглядових РЛС.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Відомо, що для підвищення ефективності ведення радіолокаційної розвідки малорозмірних цілей використовуються низка організаційних та технічних заходів, серед яких є [3 – 7]:

- ущільнення розташування РЛС на небезпечних напрямках (створення смуг виявлення маловисотних та малорозмірних цілей);
- використання РЛС усіх діапазонів частот;
- використання РЛС з кращими можливостями (найбільшим енергетичним потенціалом) та ін.

Відомо, що для підвищення якості виявлення об'єктів з малою ЕПР за допомогою оглядових РЛС необхідно збільшувати енергетичний потенціал РЛС [8]. Альтернативними шляхами підвищення якості виявлення малорозмірних цілей є [9 – 18]:

- використання енергій сторонніх джерел випромінювання;
- використання властивості збільшення ЕПР при резонансному відбитті електромагнітних хвиль від цілі;
- використання властивостей збільшення бістатичної ЕПР вторинного випромінювання у порівнянні з ЕПР зворотного вторинного випормінюваня.

У світової практиці відомі зразки РЛС, які використовують перелічені властивості для виявлення повітряних цілей («Сайлент Сентрі», «Бар'єр» та ін.) у пасивному режимах [19-24]. Але указаним РЛС теж притаманні певні недоліки [19-24].

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Розглянемо можливості збільшення ЕПР малорозмірних об'єктів в оглядових РЛС за рахунок використання властивостей бістатичної ЕПР об'єкту при рознесеному прийомі. Це стає можливим при доповненні (або введенні) в існуючі однопозиційні оглядові РЛС додаткових режимів рознесеного прийому.

При переході до рознесеного прийому відбитих від об'єкту сигналів на якість виявлення об'єкту впливають властивості бістатичної ЕПР. У більшості реальних повітряних об'єктів, у тому числі виготовлених з використанням технологій «Стелс», величина бістатичної ЕПР змінюється при зміні бістатичного кута (кут між напрямком опромінення обєкту та прийому відбитих сигналів).

На сьогодні накопичено багато інформації щодо значень моностатичної ЕПР для різних типів цілей, але даних про значення бістатичних ЕПР значно менше. Оскільки значення ЕПР об'єкту є вагомою характеристикою для визначення дальності її виявлення, то встановлення зв'язку між значеннями однопозиційної та бістатичної ЕПР є важливим для проведення порівняльного аналізу можливостей виявлення об'єктів в однопозиційних та рознесених системах.

Дослідження зв'язків між значеннями однопозиційної та бістатичної ЕПР вже проводились у багатьох відомих роботах провідними вченими. Результати досліджень наведені у відомій літературі [25 – 27]. За теперішнього часу встановлено, що значення бістатичної ЕПР в загальному випадку відрізняються від значень моностатичної ЕПР. В характері змін бістатичної ЕПР, в залежності від значення бістатичного кута, виділяють три характерні області [27]: псевдомоностатичну, бістатичну, прямого перевипромінювання.

В псевдомоностатичній області бістатична ЕПР задовольняє теоремі про еквівалентність бістатичної та моностатичної ЕПР, яка сформульована для випадку $\lambda \to 0$ і $\beta < \pi$ наступним чином. Бістатична ЕПР тіла на довжині хвилі λ співпадає з моностатичною ЕПР тіла, яке розташоване на бісектрисі бістатичного кута для довжини хвилі $\lambda/\cos(\beta/2)$. Такий ефект спостерігається в діапазоні бістатичних кутів до $\beta \approx 5^\circ$. В більшості випадків $\beta > 5^\circ$, і ЕПР таких тіл не залежить від довжини хвилі, тому деяке збільшення довжини хвилі не має суттєвого значення.

Реальні повітряні об'єкти із достатньо гладкими поверхнями зазвичай можна описати сферами, еліптичними циліндрами, конусами та ін. Для великих розмірів сфер псевдомоностатична область бістатичної ЕПР спостерігається до значень бістатичного кута $\beta \approx 100^\circ$ з похибками до 3 дБ. Для сфер малих розмірів псевдомоностатична область спостерігається до значень бістатичних кутів $\beta \approx 40^\circ$.

Таким чином, в залежності від структури об'єкта псведомоностатична область бістатичної ЕПР може спостерігатися для бістатичних кутів до 40-100 градусів [27].

В бістатичній області наведена вище теорема еквівалентності не виконується, та бістатична ЕПР об'єкту суттєво відрізняється від його моностатичної ЕПР. В загальному випадку для об'єктів складної структури, якими є літальні апарати, бістатична ЕПР об'єкта в бістатичної області менш за його моностатичну ЕПР. Винятками з цього загального правила є наступні випадки:

- об'єкти, які під деякими кутами опромінення мають мали значення моностатичної ЕПР, а при визначених бістатичних кутах мають дзеркальне перевипромінювання;
- об'єкти, які розроблялися спеціально для забезпечення малих значень моностатичної ЕПР під визначеними кутами опромінення (наприклад, виконаними за технологією «Стелс»);
- затінення елементів перевипромінювання в моностатичній геометрії об'єкта та її відсутність в бістатичній геометрії.

Область прямого перевипромінювання знаходиться поблизу бістатичного кута $\beta \approx 180^\circ$. Для цієї області характерне когерентне розсіяння радіохвиль об'єктом та різке збільшення значення бістатичної ЕПР. При бістатичному куті $\beta \approx 180^\circ$, значення бістатичної ЕПР визначається виразом (1) [26]:

$$\sigma_A = 4\pi \frac{A^2}{\lambda^2}, \qquad (1)$$

де σ_A – бістатична ЕПР; A – площа поперечного перерізу, яка перпендикулярна напряму поширення радіохвиль.

Явище різкого зростання бістатичної ЕПР спостерігається тільки у досить вузькому секторі при значеннях бістатичного кута $\beta \approx 180^\circ$. Відхилення від бістатичного кута $\beta \approx 180^\circ$ повинно бути не більше за півширину головного пелюстка діаграми направленості випромінюючої апертури А. Відомо, що ширина цього головного пелюстка за рівнем половинної потужності визначається виразом (2) [25]:

$$\Delta\theta \approx \lambda / L_A, \qquad (2)$$

де $\Delta\theta$ – ширина головного пелюстка діаграми направленості випромінюючої апертури А за рівнем половинної потужності; L_A – лінійний розмір випромінюючої апертури А.

Для реальних цілей із співвідношенням довжини хвилі до розмірів цілі порядку 0,01-0,02 ширина головного променя $\Delta\theta$ складає 0,5-10, тобто передавальна позиція, об'єкт та приймальна позиція повинні знаходитися на одній лінії. Таки випадки досить рідкісні на практиці. Однак в області бічних пелюсток, які утворюються об'єктом, бістатична ЕПР також може суттєво перевищувати моностатичну ЕПР. Так у [25] показано, що для об'єкту із шириною головного променя перевипромінювання вперед біля 30 (за рівнем мінус 3 дБ) у секторі бістатичних кутів біля 200 градусів значення бістатичної ЕПР перевищують однопозиційну ЕПР не менш ніж на 13 дБ.

В області бічних пелюсток діаграми вторинного випромінювання найбільший інтерес представляє залежність ЕПР від кута відхилення від лінії випромінювання вперед, усереднена по декільком сусіднім пелюсткам. Така залежність відображає загальний характер зменшення ЕПР при відхиленні від кута 180 градусів, та визначається виразом (2) [25]:

$$\sigma_Б(\beta) = \frac{\lambda L_t}{\pi^2 |\pi - \beta|^3}, \qquad (3)$$

де $\sigma_Б(\beta)$ – залежність бістатичної ЕПР від бістатичного кута β окіл кута 180 градусів; β – бістатичний кут окіл 180 градусів; L_t – довжина проекції тіньового контуру апертури А на площину, яка перпендикулярна напрямку падаючої хвилі.

Оскільки ракурс об'єкту під час спостереження може випадково змінюватися, то замість значення L_t у виразі (3) доцільно використовувати усереднe-

ну по можливим ракурсам величину $\tilde{L}_t$. В цьому випадку вираз (3) можна записати у вигляді (4) :

$$\sigma_Б(\beta) = \begin{cases} 4\pi\left(\tilde{S}_t/\lambda\right)^2, & \left|\pi - \tilde{\beta}\right| < \beta^*; \\ \lambda\tilde{L}_t \Big/ \left(\pi^2\left|\pi - \beta\right|^3\right), & \left|\pi - \tilde{\beta}\right| > \beta^*, \end{cases} \quad (4)$$

де $\tilde{S}_t$ – усереднена по можливим ракурсам об'єкту (відносно напрямку падаючої хвилі) площа апертури A_t; β^* визначається виразом:

$$\beta^* = \frac{\lambda}{\pi}\sqrt[3]{\frac{\tilde{L}_t}{4\tilde{S}_t^2}}. \quad (5)$$

У відомій літературі підкреслюється, що точних аналітичних способів визначення зв'язку між моностатичною та бістатичною ЕПР для широкого кола об'єктів різних конфігурацій не існує. В роботі [26] запропоновано емпіричну формулу (6), яка отримана за результатом апроксимації ряду експериментальних даних та досить адекватно описує залежність бістатичної ЕПР від бістатичного кута:

$$\sigma_{\dot{A}}(\beta) = \sigma(0)\left\{1 + \exp\left[n|\beta| - (2{,}4n + 1)\right]\right\}, \quad (6)$$

де $\sigma_{\dot{A}}(\beta)$ – бістатична ЕПР; $\sigma(0)$ – моностатична ЕПР; β – бістатичний кут, рад, значення якого розраховується за виразом (7):

$$\beta = \arccos\left[\frac{1}{2R_1R_2}(R_1^2 + R_2^2 - b^2)\right]; \quad (7)$$

R_1, R_2 – відстань між випромінювачем та об'єктом, об'єктом та приймачем, відповідно; b – відстань між передавачем та приймачем (база); $n = 7 - 10$ – емпіричний коефіцієнт, який залежить від конфігурації та складності об'єкта.

Графік залежності зміни бістатичної ЕПР об'єкту відносно моностатичної ЕПР, розрахований за виразом (6), наведено на рис. 1.

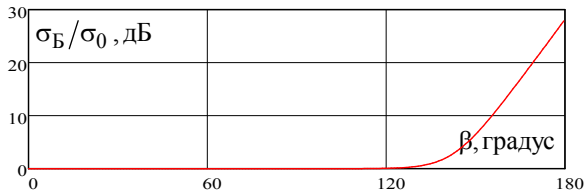

Рис. 1. Залежність відношення бистатичної (σ_A) до моностатичної (σ_0) ЕПР цілі від бістатичного кута β

З аналізу рис. 1 видно, що починаючи зі значень бістатичного кута від 135 градусів спостерігається збільшення значення бістатичної ЕПР відносно моностатичної ЕПР.

Представляє інтерес також зміна ЕПР цілі при бістатичному прийомі для об'єктів, які використовують протирадіолокаційні покриття. В цьому випадку дія протирадіолокаційних покриттів суттєво знижується, оскільки вони розраховані на придушення відбиттів у напрямку приходу падаючої хвилі. Зниження ефективності протирадіолокаційних покриттів особливо відчутно в області прямого перевипромінювання (при бістатичних кутах близьких до $\beta \approx 100^\circ$). В цьому випадку значення ЕПР не залежить від наявності протирадіолокаційного покриття та визначається за виразом (1).

Висновки і напрямки подальших досліджень

Таким чином, за результатами проведених досліджень, з урахуванням результатів експериментальних досліджень [25-27] щодо порівняння бістатичної та моностатичної ЕПР повітряних об'єктів, можна зробити наступні висновки:

– при значеннях бістатичних кутів менше 136 градусів, значення бістатичної ЕПР не перевищує, а в деяких випадках менше на 2-5 дБ, значень моностатичної ЕПР, що приводить к погіршенню можливостей РЛС по виявленню повітряних об'єктів;

– при значеннях бістатичних кутів близьких до 180 градусів значення бістатичної ЕПР значно перевищує значення моностатичної ЕПР (до 30 дБ), що покращує можливості РЛС по виявленню малорозмірних повітряних об'єктів;

– порізаність діаграми бістатичного розсіяння менше за порізаність діаграми моностатичного розсіювання, що зменшує мерехтіння (шум) об'єкту та зменшує його вплив на похибки вимірювання координат об'єкту;

– для об'єктів, які виконанні за технологією «Стелс», спостерігається збільшення значень бістатичної ЕПР у порівнянні з моностатичної ЕПР.

У подальших дослідженнях необхідно провести розрахунок ЕПР повітряних об'єктів при об'єднанні методів однопозиційного та рознесеного прийому сигналів в оглядових РЛС.

Список літератури

1. Информационный сборник «Особенности боевого применения высокоточных средств поражения и способы повышения эффективности борьбы с ними» / И.П. Кибалко. – Минск: 1034 ЦВИиИ, 2008. – 102 с.

2. Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітними цілями (оцінка можливостей, тенденції розвитку засобів протиповітряної оборони): монографія / І.С. Романченко, О.М. Загорка, С.Г. Бутенко, О.В. Дейнега. – Житомир: Полісся, 2011. – 344 с.

3. Довідник учасника АТО: озброєння і військова техніка Збройних Сил Російської Федерації / [А.М. Алімпієв, Г.В. Пєвцов, Д.А. Гриб та ін.]; за заг. ред. А.М. Алімпієва. – Х.: Оригінал, 2015. – 732 с.

4. Образцов Е.А. Маловысотные РЛС: шаг за шагом / Е.А. Образцов, О.В. Пушков // Воздушно-космическая оборона, 2012. – № 4. – С. 17-22.

5. Грибов Е. О применении высокоточного оружия в оперативном контуре разведывательно-ударных действий / Е.Грибов, Б. Казарьян и др. // Вестник Академии военных наук, 2008. – № 3. – С. 45-50.

6. Загоруля Б. Предложение по совершенствованию разведывательно-огневой системы малой дальности для борьбы с крылатыми ракетами / Б. Загоруля // Наука и военная безопасность, 2008. - № 3 - С. 9-13.

7. Кругликов С. Способ защиты объектов от ударов высокоточного оружия / С.Кругликов, В.Кругликов // Наука и военная безопасность, 2008. - № 1. - С. 26-31.

8. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д.Ширман, В.А.Манжос // М.:Радио и связь, 1981. – 416 с.

9. Ковалевський С.М. Пропозиції щодо створення скритого маловисотного радіолокаційного поля в умовах ведення сучасних мережецентричних та гібридних війн / С.М.Ковалевський, Г.В.Певцов, Г.В.Худов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУПС, 2015. - № 1 (18). – С. 77-81.

10. Кондратенко А.П. Роль и место нетрадиционной радиолокации в системе контроля воздушного пространства / А.П.Кондратенко // Збірник наукових праць: – Х.: ХВУ, 2002. – Вип. 1 (39). – С. 87-90.

11. Кондратенко А.П. Принципы и варианты построения радиолокационной системы с использованием излучения мобильной связи / А.П.Кондратенко, П.А.Коваленко, И.С.Добрынин // Системи обробки інформації: Х.: ХУПС, 2006. – Вип. 4 (53). – С. 71-78.

12. Мякиньков А.В. Обнаружение наземных целей в многопозиционной просветной радиолокационной системе / А.В.Мякиньков, Д.М.Смирнова // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника, 2010. – Вып. 5. – С. 47-55.

13. Смирнова Д.М. Определение координат наземных целей в многопозиционной просветной радиолокационной системе / Д.М.Смирнова // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника, 2011. – Вып. 5. – С. 72-78.

14. Бляхман А.Б. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружении объектов при радиолокации на просвет / А.Б. Бляхман, И.А. Рунова // Радиотехника и электроника, 2001. – Т. 46, № 4. – С. 424-432.

15. Семашко П.Г. Характеристики обнаружения телевизионного сигнала яркости в радиолокационной системе с посторонним подсветом / П.Г.Семашко, А.Е.Охрименко // Доклады БГУИР, 2005. – Т. 10, № 2. – С. 60-64.

16. Попов И.В. Освещение воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций КВ-диапазона / И.В. Попов, И.В. Луценко, В.И. Луценко // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. научных трудов / Под ред. А.И. Громыко, А.В. Сарафанова. – М.: Радио и свiязь, 2006. – С. 25-28.

17. Луценко И.В. Бистатические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связных станций коротковолнового диапазона / И.В. Луценко, И.В. Попов, В.И. Луценко // Радиофизика и электроника, 2007. – Т. 12, № 1. – С. 199-203.

18. Ксендзук А.В. Неизлучающая радиолокационная система, основанная на приеме отраженных сигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / А.В. Ксендзук, В.Ф. Фатеев, С.А. Попов // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 2009. - № 4. - С. 60-65.

19. Silent Sentry. Innovative Technology for Passive, Persistent Surveillance // Lockheed Martin Corp. [2005]. URL: http://www.lockheedmartin.com/data/assets/10644.pdf

20. European Standard ETSI EN 300 401 V1.3.3 (2001-05) «Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers» // European Telecommunications Standards Institute [2001] URL: http://www.etsi.org

21. European Standard ETSI EN 300 744 V1.4.1 (2001-01) «Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television» // European Telecommunications Standards Institute [2001]. URL: http://www.etsi.org

22. Демидюк Е. Альтернативный вариант / Е.Демидюк // Воздушно-космическая оборона, 2005. – № 1 (20) – С. 12-15.

23. Рябов К. Перспективная РЛС нового класса от EADS / К.Рябов // [Электронный ресурс]: - М., 2012. – Режим доступа: http://www.topwar.ru.

24. Демидюк А. Скрытый «Рубеж» воздушного контроля. Новые решения старых проблем маловысотной локации / А.Демидюк, Е.Демидюк // Выпуск vpk-news.ru, 2013. - № 45 (513).

25. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С.Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

26. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы / В.Я.Аверьянов – Минск: Наука и техника, 1978. – 182 с.

27. Willis N.J. Bistatic Radar, Second Edition / Nicholas J. Willis. – Raleigh: SciTech Publishing, 2005. – 329 p.

Надійшла до редколегії 24.03.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Васюта, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ОДНОПОЗИЦИОННОМ И РАЗНЕСЕННОМ ПРИЕМАХ СИГНАЛОВ В ОБЗОРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ

С.Н. Ковалевский, В.А. Тютюнник, Г.В. Худов

В работе проведен сравнительный анализ эффективной поверхности рассеяния малоразмерных воздушных объектов при использовании одной обзорной радиолокационной станции и разнесенного приема сигналов двумя обзорными радиолокационными станциями. Разработаны рекомендации по использованию однопозиционной или многопозиционной радиолокационной системы при обнаружении воздушного объекта в зависимости от угла приема сигналов.

Ключевые слова: *эффективная поверхность рассеяния, однопозиционная система, многопозиционная система, прием сигналов, радиолокационная станция, воздушный объект.*

METHOD OF CALCULATION OF THE EFFECTIVE SURFACE OF DISPERSION OF AIR OBJECTS OF SMALL SIZE AT THE ONE-ITEM AND CARRIED RECEPTIONS OF SIGNALS IN SURVEY RADAR STATIONS

S.N. Kovalevsky, V.A. Tjutjunnik, G.V. Hudov

In work the comparative analysis of an effective surface of dispersion of air objects of small size is carried out at use of one survey radar station and the carried reception of signals by two survey radar stations. Recommendations about use of the one-item or multiitem radar-tracking system at detection of air object depending on a corner of reception of signals are developed.

Keywords: *an effective surface of dispersion, one-item system, multiitem system, reception of signals, radar station, air object.*