

УДК 621.396

С.М. Ковалевський

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОЗНЕСЕНОГО ПРИЙОМУ СИГНАЛІВ В ОГЛЯДОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЯХ ПРИ ВИЯВЛЕННІ МАЛОРОЗМІРНИХ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

*Розглянута сутність введення в оглядову радіолокаційну станцію додаткового режиму рознесеного прийому. Проведена оцінка ефективної поверхні розсіяння повітряних об'єктів в режимах моностатичного та бістатичного прийому та оцінка сумарної ефективної поверхні розсіяння. Зроблено висновок про доцільність використання рознесеного прийому сигналів в оглядових радіолокаційних станціях при виявленні малорозмірних повітряних об'єктів.*

**Ключові слова:** рознесений прийом сигналів, оглядова радіолокаційна станція, ефективна поверхня розсіяння, малорозмірний повітряний об'єкт.

### Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Постійне зростання вимог до об'єму та якості радіолокаційної інформації щодо повітряної та завадової обстановки, забезпеченню високої захищеності інформаційних засобів від впливу засобів радіоелектронної боротьби обумовлює необхідність пошуку не тільки нових технічних рішень при створенні різних компонентів радіолокаційних станцій (РЛС), які є основними інформаційними датчиками в системах протиповітряної оборони, управління повітряними рухом та інше, але і розвивати нові нетрадиційні напрямки [1].

Одним з таких перспективних напрямків є багатопозиційна радіолокація [1-4]. Дослідження, що проведені у США, Великобританії, Франції, Німеччині у цьому напрямку, спрямовані на підвищення інформативності, завадо захищеності та живучості радіолокаційних засобів та систем різного призначення за рахунок використання в їх роботі бістатичних та багатопозиційних режимів роботи [1, 4]. Крім того, це забезпечує надійне спостереження за малопомітними повітряними об'єктами, в тому числі, крилатими ракетами та літаками, що виготовлені за технологією «Стелт» та застосовуються в умовах радіоелектронного та вогневого придушення, а також перевипромінювання від підстилаючої поверхні та місцевих предметів [1, 5, 6].

В роботах [7, 8] розроблено пропозиції щодо створення скритого маловисотного радіолокаційного поля в сучасних умовах за рахунок рознесених радіолокаційних систем, які використовують випромінювання зовнішніх передатчиків, та розроблено метод розрахунку ефективної поверхні розсіяння (ЕПР) малорозмірних повітряних об'єктів при однопозиційному та рознесеному прийомах сигналів в оглядових РЛС.

**Мета статті** – провести оцінку ефективності використання рознесеного прийому сигналів в огля-

дових РЛС при виявленні малорозмірних повітряних об'єктів.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Відомо, що для підвищення ефективності ведення радіолокаційної розвідки малорозмірних цілей використовуються низка організаційних та технічних заходів, які узагальнені в роботі [8]:

- 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.

В роботі [8] також розглянуто альтернативні шляхи підвищення якості виявлення малорозмірних повітряних об'єктів:

- 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 випромінювання.

Основні недоліки, що притаманні переліченим альтернативним методам виявлення малорозмірних повітряних об'єктів, відмічаються у відомих роботах [9 – 11]. В роботі [8] розглянута можливість 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. За результатами проведених досліджень, з урахуванням результат експериментальних досліджень [8] щодо порівняння бістатичної та моностатичної ЕПР повітряних об'єктів, встановлено [8]:

- 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 розсіяння, 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.

### Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Проведемо оцінку ефективності використання рознесеного прийому сигналів в оглядових РЛС при виявленні малорозмірних повітряних об'єктів. Розглянемо введення в оглядову РЛС додаткового режиму рознесеного прийому. Сутність введення в оглядову РЛС додаткового режиму рознесеного прийому наведена на рис. 1. На рис. 1 прийняті наступні позначення:  $\sigma_0$  – моностатична ЕПР,  $\sigma_B$  – бістатична ЕПР,  $\beta$  – бістатичний кут.

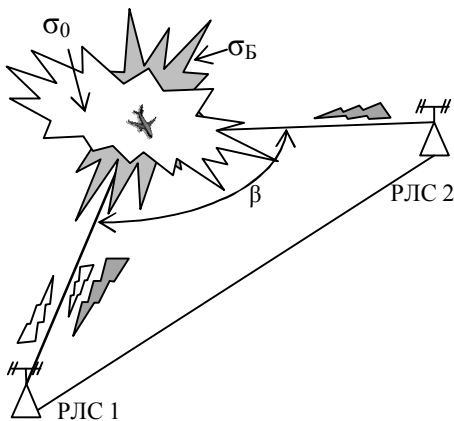


Рис. 1. Сутність введення в оглядову РЛС додаткового режиму рознесеного прийому

Сутність введення в оглядову РЛС додаткового режиму рознесеного прийому полягає в тому, що РЛС 1 здійснюється прийом сигналів, що випромінюються РЛС 2 та відбиваються від повітряного об'єкта (рис. 1).

В роботах [2-4, 8] встановлено, що в характері змін бістатичної ЕПР, в залежності від значення бістатичного кута, виділяють три характерні області [4, 8]:

- псевдомоностатичну;
- бістатичну;
- прямого перевипромінювання.

В псевдомоностатичній області бістатична ЕПР задовольняє теорему про еквівалентність бістатичної та моностатичної ЕПР, яка сформульована для випадку  $\lambda \rightarrow 0$  ( $\lambda$  – довжина хвилі) і  $\beta < \pi$  наступним чином. Бістатична ЕПР тіла на довжині хвилі  $\lambda$  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  $\beta \approx 5^\circ$  [8]. 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 [8]. Для сфер малих розмірів псевдомоностатична область спостерігається до значень бістатичних кутів  $\beta \approx 40^\circ$  [8].

Таким чином, в залежності від структури об'єкта псевдомоностатична область бістатичної ЕПР може спостерігатися для бістатичних кутів до 40-100 градусів [4, 8].

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 бістатичній області менш за його моностатичну ЕПР. Винятками з цього загального правила є наступні випадки, які перелічені в [4, 8]:

- 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) [3, 4, 8]:

$$\sigma_B = 4\pi A^2 / \lambda^2, \quad (1)$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу, яка перпендикулярна напряму поширення радіохвиль.

В області бічних пелюсток діаграми вторинно 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) [2, 8]:

$$\sigma_B(\beta) = \lambda L_t / (\pi^2 |\pi - \beta|^3), \quad (2)$$

де  $\sigma_B(\beta)$  – залежність бістатичної ЕПР від бістатичного кута  $\beta$  окіл кута 180 градусів;  $L_t$  – довжина проекції тінювого контуру апертури  $A$  на площину, яка перпендикулярна напрямку падаючої хвилі.

Оскільки ракурс об'єкту під час спостереження може випадково змінюватися, то замість значення  $L_t$  у виразі (2) доцільно використовувати усереднену по можливим ракурсам величину  $\tilde{L}_t$ . В цьому випадку вираз (2) можна записати у вигляді (3) [8]:

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

де  $\tilde{S}_t$  – усереднена по можливим ракурсам об'єкту (відносно напрямку падаючої хвилі) площа апертури  $A_t$ ;  $\beta^*$  визначається виразом (4):

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

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 [3] запропоновано емпіричну формулу (5), яка отримана за результатом апроксимації ряду експериментальних даних та досить адекватно описує залежність бістатичної ЕПР від бістатичного кута:

$$\sigma_A(\beta) = \sigma_0 \{1 + \exp[n|\beta| - (2,4n + 1)]\}. \quad (5)$$

Бістатичний кут  $\beta$  розраховується як [8]:

$$\beta = \arccos \left[ \frac{1}{2R_1R_2} (R_1^2 + R_2^2 - b^2) \right]; \quad (6)$$

де  $R_1, R_2$  – відстань між РЛС 1 та об'єктом, об'єктом та РЛС 2, відповідно;  $b$  – відстань між РЛС 1 та РЛС 2 (база);  $n = 7 - 10$  – емпіричний коефіцієнт, який залежить від конфігурації та складності об'єкта.

Проведемо розрахунки значення сумарної ЕПР повітряного об'єкту, яке може бути отримана при додатковому введенні в оглядову активну РЛС режиму рознесення прийому. Сумарну ЕПР будемо розраховувати за виразом (7):

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_B^2}, \quad (7)$$

де  $\sigma_\Sigma$  – сумарна ЕПР.

Складові виразу (7) моностатичну  $\sigma_0$  та бістатичну  $\sigma_B$  ЕПР розрахуємо у відповідності з методикою та з використанням результатів математичного моделювання, отриманих в [12]. В табл. 1, 2 наведені середні значення моностатичної, бістатичної та сумарної ЕПР крилатих ракет типу AGM-86C та Taurus KEPD 350 для метрового діапазону роботи оглядової РЛС при горизонтальній та вертикальній поляризації відповідно.

Таблиця 1

Середні значення моностатичної, бістатичної та сумарної ЕПР повітряних об'єктів (горизонтальна поляризація)

Тип повітряного об'єкту	Тип ЕПР	Значення ЕПР, м <sup>2</sup>		
		кут розносу (для бістатичної ЕПР)/ азимутальний ракурс (для моностатичної ЕПР), град		
		0-45	45-135	135-180
AGM-86C	$\sigma_0$	11,342	10,454	10,603
	$\sigma_B$	3,974	1,262	19,99
	$\sigma_\Sigma$	12,018	10,529	22,628
Taurus KEPD 350	$\sigma_0$	13,609	7,292	5,720
	$\sigma_B$	13,130	2,523	35,343
	$\sigma_\Sigma$	18,91	7,716	35,803

Таблиця 2

Середні значення моностатичної, бістатичної та сумарної ЕПР повітряних об'єктів (вертикальна поляризація)

Тип повітряного об'єкту	Тип ЕПР	Значення ЕПР, м <sup>2</sup>		
		кут розносу (для бістатичної ЕПР)/ азимутальний ракурс (для моностатичної ЕПР), град		
		0-45	45-135	135-180
AGM-86C	$\sigma_0$	2,609	4,894	3,024
	$\sigma_B$	2,818	2,636	7,061
	$\sigma_\Sigma$	3,840	5,558	7,681
Taurus KEPD 350	$\sigma_0$	8,582	8,299	3,318
	$\sigma_B$	11,297	5,931	18,358
	$\sigma_\Sigma$	14,187	10,2	18,655

На рис. 1 наведено залежності нормованих моностатичних, бістатичних та сумарних ЕПР крилатих ракет типу AGM-86C та Taurus KEPD 350 за даними табл. 1, 2.

## Висновки

За результатами аналізу залежностей ЕПР повітряних об'єктів, наведених на рис. 1а, 1б можна зробити наступні висновки. В залежності від ракурсу та типу повітряного об'єкту більше значення приймає моностатична або бістатична ЕПР. Тобто в одних випадках перевагу має використання моностатичної ЕПР, а в інших випадках переважним є використання бістатичної ЕПР.

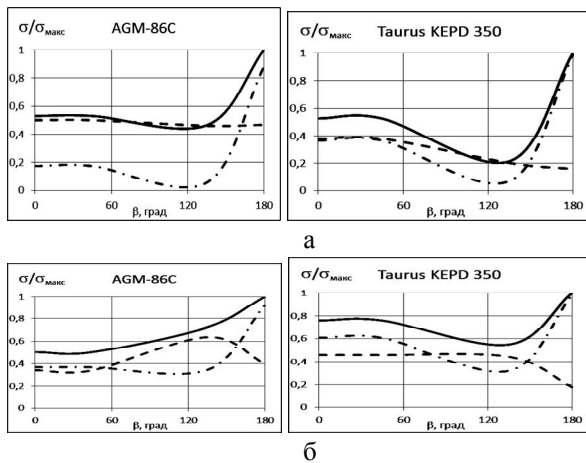


Рис. 1. Нормована ЕПР повітряних об'єктів  
(--- -  $\sigma_0$ , - · - -  $\sigma_B$ , — -  $\sigma_\Sigma$ ):  
а – на горизонтальній поляризації;  
б – на вертикальній поляризації

При використанні комбінації моностатичної та бістатичної ЕПР забезпечується найбільш повне використання відбиваючих властивостей повітряного об'єкту.

Для забезпечення можливості одночасного використання моностатичної та бістатичної ЕПР повітряного об'єкту необхідно забезпечити можливість суміщення в оглядовій активній РЛС режимів однопозиційної та рознесеної локації.

У подальших дослідженнях необхідно провести розрахунок показників якості виявлення повітряних об'єктів з використанням режимів одно позиційного та рознесеного прийомів в оглядових РЛС.

## Список літератури

1. Аношкин И.М. Зарубежные многопозиционные радиолокационные системы скрытого контроля воздушного пространства / И.М. Аношкин // Наука и военная безопасность, 2007. – № 1. – С. 28-33.
2. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

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

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

5. Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітніми 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.

6. Особенности боевого применения высокоточных средств поражения и способы повышения эффективности борьбы с ними / Под общ. ред. Ю.Н. Черного. – Минск: 1034 ЦВИИИ, 2008. – 102 с.

7. 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.

8. Ковалевський С.М. Метод розрахунку ефективної поверхні розсіяння малорозмірних повітряних об'єктів при однопозиційному та рознесеному прийомі сигналів в оглядових радіолокаційних станціях / С.М. Ковалевський, В.О. Тютюнник, Г.В. Худов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 2 (43). – С. 28-31.

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

10. 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>.

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

12. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: моногр. / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко и др.; под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУ ВС, 2009. – 468 с.

Надійшла до редколегії 5.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В.Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗНЕСЕННОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ В ОБЗОРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

С.Н. Ковалевский

Рассмотрена суть введения в обзорную радиолокационную станцию дополнительного режима разнесенного приема. Проведена оценка эффективной поверхности рассеяния воздушных объектов в режимах моностатического и бистатического приема и оценка суммарной эффективной поверхности рассеяния. Сделан вывод о целесообразности использования разнесенного приема сигналов в обзорных радиолокационных станциях при обнаружении малоразмерных воздушных объектов.

**Ключевые слова:** разнесенный прием сигналов, обзорная радиолокационная станция, эффективная поверхность рассеяния, малоразмерный воздушный объект.

## ESTIMATION OF EFFICIENCY OF USE OF THE CARRIED RECEPTION OF SIGNALS IN SURVEY RADAR STATIONS AT DETECTION OF SMALL SIZE AIR OBJECTS

S.N. Kovalevsky

The introduction essence in survey radar station of an additional mode of the carried reception is considered. The estimation of an effective surface of dispersion of air objects in modes monostatic and bistatic reception and an estimation of a total effective surface of dispersion is spent. The conclusion is drawn on expediency of use of the carried reception of signals in survey radar stations at detection small size air objects.

**Keywords:** the carried reception of signals, survey radar station, an effective surface of dispersion, small size air object.