

УДК 621.396.96, 623.746.4-519

І.А. Євсєєв

Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

## ПЕРСПЕКТИВНИЙ КОМПЛЕКС ПОВІТРЯНОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ НА ОСНОВІ МІНІ БПЛА

*Показано можливості підвищення ефективності застосування розвідувальних міні БПЛА за рахунок розміщення на їх борту радіолокаційної станції з синтезуванням апертури антени. Розглянуто принципи побудови комплексу повітряної розвідки на основі рознесеної (багатопозиційної) структури. Основна увага приділяється бістатичній (двопозиційній) радіолокаційній станції з синтезуванням апертури антени.*

**Ключові слова:** повітряна радіолокаційна розвідка, міні БПЛА, бістатичні РСА.

### Вступ

Форми і способи ведення збройної боротьби визначаються багатьма факторами, серед яких найважливішими вважаються воєнно-політичні цілі держав, що воюють, та бойові властивості зразків, комплексів і систем озброєння. У сучасних умовах високий рівень інформаційного забезпечення бойових дій військ (сил) становиться визначальним фактором досягнення стратегічної і оперативної переваги над противником.

Вищою оперативністю отримання інформації володіють авіаційні комплекси повітряної розвідки, що забезпечують велику територіальну вибірковість при менших фінансових витратах в порівнянні з космічними системами розвідки, можливістю ведення розвідки з великої відстані від лінії зіткнення військ в порівнянні з наземними засобами розвідки. Однак, ефективність застосування літаків-розвідників, істотно залежить від затінювання цілей. Так, в Близько-східному регіоні, що характеризується переважанням пустинної місцевості, затінювання близьке до мінімального, а в гористому Балканському – серйозно знижує ефективність застосування комплексів розвідки, так як тут не менше 50% території, що розвідується, потрапляє в зони невидимості.

Серед бойових засобів, призначених вирішувати багатопланові завдання в сучасних військових конфліктах («війнах малої інтенсивності»), широке застосування отримали безпілотні літальні апарати (БПЛА) [1, 2]. Як перспективний напрям розвитку повітряної розвідки розглядаються комплекси міні БПЛА, типовим корисним навантаженням яких є ТВ-, ІЧ-камери і фотоапарат. Мала ефективна площа розсіювання (ЕПР), низька візуальна, теплова і акустична помітність БПЛА, у поєднанні з можливостями корисних навантажень складають серйозну конкуренцію іншим засобам для збору розвідувальної інформації в умовах активної протидії засобів ППО противника [3].

**Постановка задачі.** Загальна тенденція застосування БПЛА зводиться до істотного розширення можливостей застосування БПЛА практично на всіх

рівнях управління у військах. Проте на ефективність застосування відеоапаратури суттєвий вплив мають метеумови (низька хмарність, туман, опади, турбулентність та ін.), загалом, вимушуючи здійснювати політ на менших висотах, що обмежує область огляду і робить їх більш уразливими. Крім того, обмежена можливість виявлення цілей на місцевості з високою рослинністю.

В даний час одним з основних засобів добування інформації на ТВД, завдяки незалежності ведення розвідки від часу доби і погодних умов, а також високому розрізненню отриманих зображень, є комплекси повітряної радіолокаційної розвідки [4]. Проте розміщення радіолокаційної станції з синтезуванням апертури антени (РСА) на борту малогабаритного БПЛА не представляється можливим із-за її масогабаритних характеристик. Крім того, активна система істотно знижує живучість апарату.

Вирішити ці проблеми дозволяє використання рознесеної (багатопозиційної) структури. В цьому випадку система, що встановлена на борту БПЛА, працює тільки на прийом, а підсвічування зони ведення розвідки здійснюється з зони недосяжної (важкодосяжної) для засобів поразки ймовірного противника. Використання пасивних засобів розвідки дозволяє суттєво понизити ризик втрати БПЛА при його польоті в оперативної-тактичній глибині території противника. Для спостереження доцільно використовувати радіолокатор, що працює в двох спектральних діапазонах: сантиметровому – для забезпечення високого розрізнення і дециметровому – для отримання зображень об'єктів, прихованих рослинністю. Основні переваги бортових багатопозиційних радіолокаційних систем наведено у роботах [5, 6].

**Метою даної статті** є розгляд особливостей побудови комплексу повітряної радіолокаційної розвідки з низьким рівнем власного випромінювання. Основна увага приділяється бістатичній (двопозиційній) РСА.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання** – розглянути склад системи, обґрунтувати вид випромінюваного сигнала

лу та вибір груп сигналів, що випромінюються набором передавачів у багатопозиційній РСА, забезпечити режим когерентного прийому сигналів та синтезувати алгоритми оптимальної обробки сигналів у даній системі.

### Основна частина

**Склад системи.** Запропонований комплекс складається з набору високоскритних чи захищених випромінювачів (авіаційні чи супутникові носії) та спеціалізованих міні БПЛА, що оснащені портативними радіолокаційними комплексами, а також бортовим програмно-апаратним комплексом з підсистемою супутникового позиціонування. Такий комплекс можна представити у вигляді сукупності елементарних двопозиційних (бістатичних) РЛС (рис. 1).

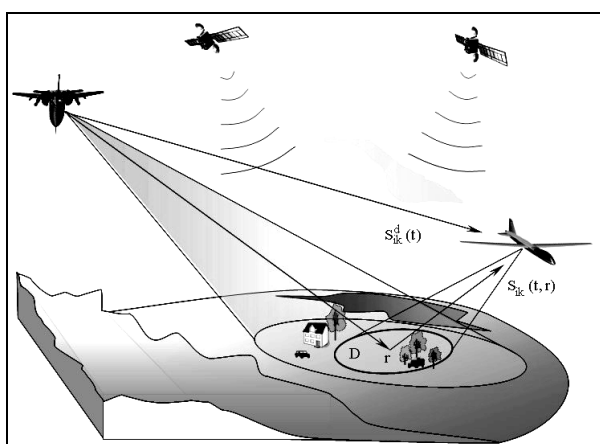


Рис. 1. Комплекс повітряної радіолокаційної розвідки на основі міні БПЛА

Радіолокаційний приймач обробляє прийняті відбиті сигнали від області земної поверхні  $D$ , що визначається діаграмою спрямованості антени. Синтез апертури антени виконується як за рахунок руху приймача (безпілотного літального апарату), так і за рахунок руху передавальних елементів системи.

Даний комплекс повітряної радіолокаційної розвідки володіє наступними можливостями:

1. Отримання інформації незалежно від метеоумов, часу доби і пори року.
2. Виявлення об'єктів, що приховані маскувальними покриттями, знаходяться в чагарникових і лісових масивах або в поверхневому шарі ґрунту.
3. Виявлення помилкових цілей, які сприймаються засобами відеоспостереження як реальні.
4. Селекція рухомих об'єктів.
5. Широкий діапазон висот дозволяє оперативно вибирати оптимальні умови зйомки з урахуванням просторового розподілу об'єктів, що спостерігаються.
6. Побудова об'ємного зображення об'єктів.

При цьому слід зазначити високу якість радіолокаційних зображень (РЛЗ), що отримуються сучасними РСА.

**Вид випромінюваного сигналу.** Основним заходом завадозахисту радіоелектронних засобів є застосування режиму підвищеної скритності роботи, зниження імпульсної потужності випромінювання, потрібної для виявлення цілі.

У багатопозиційних системах, окрім імпульсних сигналів, можуть використовуватися сигнали безперервного випромінювання, оскільки роздільне розміщення передавача і приймача дозволяє забезпечити необхідну «розв'язку» приймального і передавального трактів.

Для отримання вузької функції невизначеності (ФН) необхідна хаотичність в законі модуляції сигналу. Однак, чисто шумовий сигнал не дозволяє оптимізувати роботу приймача, оскільки має змінну амплітуду [7]. Тому шумоподібний характер сигналу бажано забезпечити шляхом закономірної зміни фази за рахунок нелінійної частотної модуляції або фазової маніпуляції. Широко застосовуються методи фазової маніпуляції, що забезпечують можливість порівняно простого контролю зміни фази сигналу, і можуть використовуватися при безперервному і імпульсному режимах випромінювання.

При виборі початкової псевдовипадкової послідовності (ПВП) необхідно врахувати збільшення числа дискрет модулюючої послідовності пов'язане з ускладненням апаратної реалізації систем обробки. Тому доцільно використовувати бінарні ПВП.

При використанні шумоподібних сигналів (ШПС) відношення сигнал/завада [8]

$$\mu(\mathbf{r}_1) = \frac{\langle |Y_S(\mathbf{r}_1)|^2 \rangle}{\langle |Y_N(\mathbf{r}_1)|^2 \rangle + \langle |Y_I(\mathbf{r}_1)|^2 \rangle}, \quad (1)$$

залежить не тільки від сигнальної

$$\langle |Y_S(\mathbf{r}_1)|^2 \rangle = K^2 E_S E_R \int_D \sigma^0(\mathbf{r}) |\tilde{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)|^2 d\mathbf{r}$$

та шумової

$$\langle |\dot{Y}_N(\mathbf{r}_1)|^2 \rangle = \frac{N_0}{2} \int_0^T |S_R(t, \mathbf{r}_1)|^2 dt = N_0 E_R$$

складової, але і від інтерференційної компоненти

$$\langle |Y_I(\mathbf{r}_1)|^2 \rangle = K^2 E_S E_R \int_{D''} \sigma^0(\mathbf{r}) |\tilde{\Psi}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)|^2 d\mathbf{r},$$

що обумовлена наявністю бічних пелюстків.

Як було показано в роботі [9] використання ШПС в радіолокаційних розвідувальних системах дозволяє ефективно виконувати побудову РЛЗ при відношеннях сигнал/завада багато менших за одиницю. У системах з декореляцією вхідних процесів використання ШПС дозволяє істотно підвищити роздільну здатність.

Використання ШПС дозволяє досягти високої завадозахищеності як по відношенню до широко-смугових, так і вузькосмугових завад; використовувати набір передавачів без істотного спотворення

результатів обробки внаслідок інтерференційних завад, а також забезпечити високу енергетичну і структурну скритність сигналу. В даний час створення ансамблів ШПС, що володіють мінімальними взаємнокореляційними функціями і ускладнення пристроїв обробки, є вирішуваними задачами.

**Вибір груп сигналів.** При використанні набору передавачів необхідно забезпечити ортогональність випромінюваних сигналів шляхом кодового, частотного, часового розділення або їх комбінацій. Вибір групи сигналів у багатопозиційної РСА суттєво впливає на якість отримуваних оцінок ЕПР (на величину спотворень, викликаних міжканальними завадами). Характер і значення спотворень для широкого класу поверхонь можна оцінити за допомогою взаємної просторової ФН

$$\dot{\Psi}_{ijk}(r, r_1) = \int_0^T \dot{S}_{ij}(t, r) \dot{S}_{ik}^*(t, r_1) dt,$$

яка, у свою чергу залежить як від виду використовуваних сигналів так і від просторової конфігурації елементів системи.

Для забезпечення ортогональності необхідно забезпечити виконання умови

$$\begin{aligned} \left| \dot{\Psi}_{ijk} \right| &= \left| \int_D \dot{\Psi}_{ijk}(r_1) dr_1 \right| = \\ &= \left| \int_0^T \int_D \int_D \dot{S}_{ij}(t, r) \dot{S}_{ik}^*(t, r_1) dr dr_1 dt \right| = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

**Забезпечення когерентного прийому.** Синтез апертури антени має на увазі формування каналів когерентного прийому відбитих сигналів. Для забезпечення когерентного режиму роботи РСА в роботі [11] запропоновано використовувати інформацію, що міститься в прямому сигналі.

Під прямим сигналом  $S_{ik}^d(t)$  розуміється сигнал, що випромінюється передавачем і прийнятий приймачем, затриманий на  $\tau(t, r_k, r_1)$  (рис. 1). Сигнальна частина результату узгодженої фільтрації (оцінка комплексного коефіцієнта відбиття поверхні) для адитивної моделі рівняння спостереження в рамках функціонально-детермінованої моделі поверхні [10] для точки  $r$  матиме вигляд

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{Sik}(r_1) &= \\ &= \int_D \dot{F}_{ik}[r, p(r)] \int_0^T S_{ik}(t, r) S_{ik}^*(t, r) S_{ik}^{Rd}(t) dt dr, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\dot{F}_{ik}[r, p(r)]$  – комплексний коефіцієнт відбиття елемента  $r$  з вектором електрофізичних параметрів  $p(r)$ ;  $S_{ik}^*(t, r)$  – опорний сигнал, комплексно спряжений з сигналом, відбитим від поверхні  $S_{ik}(t, r)$ ;  $S_{ik}^{Rd}(t)$  – результат обробки у прямому каналі. Вигляд прийнятого сигналу (характер частотної моду-

ляції) визначається взаємним переміщенням приймача та передавача.

Використання алгоритму обробки (3) в бістатичних РСА дозволяє забезпечити когерентний режим і оцінити комплексний коефіцієнт відбиття поверхні з точністю до калібрування радіолокаційної системи [11].

**Алгоритми оптимальної обробки.** При формуванні радіолокаційного зображення в бістатичній РСА в рамках методу максимальної правдоподібності і для функціонально-детермінованої моделі поверхні оптимальний алгоритм визначається виразом:

$$\dot{Y}_{ik}(r) = \hat{F}_{ik}[r, \bar{\lambda}(r)] = \int_D \dot{F}_{ik}[r, \bar{\lambda}(r)] \dot{\Psi}_{ik}(r, r_1) dr_1, \quad (4)$$

де  $\dot{Y}_{ik}(r) = \int_0^T u_{ik}(t) \dot{S}_{ik}^*(t, r) dt$  – оптимальний вихідний ефект у даній бістатичній парі;

$$\dot{\Psi}_{ik}(r, r_1) = \int_0^T \dot{S}_{ik}(t, r) \dot{S}_{ik}^*(t, r_1) dt \quad - \text{ просторова}$$

функція невизначеності бістатичної РСА.

Отже, результат узгодженої фільтрації  $\dot{Y}_{ik}(r)$  прийнятого сигналу  $u_{ik}(t)$  є строго оптимальною оцінкою комплексного РЛЗ  $\dot{F}_{ik}[r, \bar{\lambda}(r)]$ , згладжену функцією невизначеності  $\dot{\Psi}_{ik}(\bar{r}, \bar{r}_1)$ .

Основний вплив на властивості функції невизначеності в азимутальній площині здійснює характер руху приймальної антени [12].

Оптимальні оцінки питомої ЕПР в рамках стохастичних моделей поверхні в бістатичній РСА визначаються виразом [13]

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \int_D \sigma_{ik}^0[r_1, \bar{\lambda}(r_1)] |\dot{\Psi}_{Wik}(r, r_1)|^2 d\bar{r}_1 &= \\ &= |Y_{Wik}(r)|^2 - \frac{N_{0ik}}{2} E_{Wik}(r), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\dot{Y}_{Wik}(r)$  – оптимальний вихідний ефект системи;  $\dot{\Psi}_{Wik}(r, r_1)$  – просторова ФН даного алгоритму обробки;  $\dot{S}_{Wik}(t_2, r)$  – опорний сигнал системи з декореляцією прийнятого сигналу;  $E_{Wik}(r)$  – енергія опорного сигналу  $\dot{S}_{Wik}(t, r)$ .

Якщо оцінюється  $F[r, \lambda(r)]$ , то алгоритм комплексування результатів вимірювань окремих бістатичних пар в аналітичній формі має такий вигляд

$$\sum_{k=1}^{T_s} Y_{ik}(r_1) = \sum_{k=1}^{T_s} \frac{1}{2N_0} \int_0^T \alpha_{ik}^*(r_1) F(r, \lambda) \dot{\Psi}_{ik}(r, r_1) dr. \quad (6)$$

В результаті сумісної обробки даних істотно підвищується точність оцінок за рахунок зменшення величини флуктуаційних і шумових помилок.

## Висновки

Запропонований комплекс повітряної радіолокаційної розвідки на основі міні БПЛА спроможний вирішувати завдання забезпечення наземних засобів оперативною інформацією, а також виконання задач побудови радіолокаційних зображень та подальшої інтерпретації їх з високою ефективністю при виконанні вимог завадозахищеності і скритності. Застосування такого комплексу відкриває нові можливості створення багатофункціональної інформаційної системи аерокосмічного моніторингу, що поєднає широкі покриття великих територій і детальність опрацювання окремих ділянок місцевості. Використання безпілотних літальних апаратів дозволяє мінімізувати вартість системи в цілому і забезпечити відносно невисоку вартість отриманих зображень.

Подальшим розвитком роботи є моделювання роботи такого комплексу.

## Список літератури

1. Харченко О.В. Тенденції розвитку військової авіації на початку XXI століття / О.В. Харченко // *Наука і оборона*. – 2003. – №3. – С. 37-44.
2. *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems. The Global Perspective*. – France: UVS International, 2005. – P. 204.
3. Харченко О.В. Класифікація та тенденції створення безпілотних літальних апаратів військового призначення / О.В. Харченко, В.В. Кулешин, Ю.В. Коцуренко // *Наука і оборона*. – 2005. – №1. – С. 47-54.
4. Дудник П.И. Многофункциональные радиолокационные системы: учеб. пособие для вузов / П.И. Дудник, А.Р. Ильчук, Б.Г. Татарский; под ред. Б.Г. Татарского. – М.: Дрофа, 2007. – 283 с.
5. Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов; под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
6. Волосюк В.К. Анализ возможностей многопозиционных РСА и комплексирование измерений / В.К. Волосюк, А.В. Ксендзук, И.А. Евсеев // *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна*. – 2004. – Вип. 2, № 646. – С. 124-131.
7. *Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана: учебн. пособ. для вузов. М. – Сов. радио, 1970. – 560 с.*
8. Ксендзук А.В. Использование шумоподобных сигналов в радиолокационных системах дистанционного зондирования / А.В. Ксендзук // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – Москва, Россия. – 2004. – Т. 9, № 9-10. – С. 62-72.
9. Волосюк В.К. Повышение разрешающей способности РСА при использовании шумоподобных сигналов с учетом стохастического характера отражающей поверхности / В.К. Волосюк, А.В. Ксендзук, И.А. Евсеев // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. научн. тр. – Х.: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2005. – Вып. 26. – С. 133-138.*
10. Волосюк В.К. Физические основы дистанционного зондирования природных сред радиотехническими средствами аэрокосмического базирования: учеб. пособ. – Х.: Харьк. авиац. ин-т. – 1997. – 97 с.
11. Ксендзук А.В. Разработка алгоритма когерентного приема сигналов с учетом пространственного разнесения приемных и передающих элементов РСА / А.В. Ксендзук, И.А. Евсеев // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сборник научных трудов*. – Х.: «ХАИ», 2005. – Вып. 29. – С. 126-131.
12. Евсеев И.А. Исследование поведения функций неопределенности в бистатических радиолокационных системах с синтезированием апертуры антенны / И.А. Евсеев, Р.П. Волощук // *Системы обработки информации*. – Х.: ХУПС, 2007. – Вип. 9(67). – С. 45-49.
13. Волосюк В.К. Оптимальные алгоритмы построения радиолокационных изображений в бистатических радиолокационных системах с синтезированием апертуры / В.К. Волосюк, А.В. Ксендзук, И.А. Евсеев // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – Х.: ХУПС, 2005. – Вип.1 (1). – С. 59-64.

Надійшла до редколегії 1.07.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.К. Волосюк, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАИ», Харків.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПЛЕКС ВОЗДУШНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ НА ОСНОВЕ МИНИ БПЛА

И.А. Евсеев

Показаны возможности повышения эффективности применения разведывательных мини БПЛА за счет размещения на их борту радиолокационной станции с синтезированием апертуры антенны. Рассмотрены принципы построения комплекса воздушной разведки на основе разнесенной (многопозиционной) структуры. Основное внимание уделяется бистатической (двухпозиционной) РСА.

**Ключевые слова:** воздушная радиолокационная разведка, мини БПЛА, бистатические РСА.

## PERSPECTIVE COMPLEX OF AERIAL RADIO-LOCATION RECONNAISSANCE ON BASIS MINI UAV

I.A. Evseev

New possibilities of increase of efficiency of application are reconnaissance mini UAV due to placing on their side of the synthetic aperture radar. Principles of construction of the complex of aerial reconnaissance are considered on the basis of set (multiposition) about a structure. Basic attention is spared bistatic (by twoposition) SAR.

**Keywords:** aerial radio-location reconnaissance, mini UAV, bistatic SAR.