

## СПОСІБ ВИМІРУ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ДАЛЬНІСНИХ ПОРТРЕТІВ МАКЕТІВ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ В БЕЗЛУНОВИХ КАМЕРАХ

к.т.н. В.С. Наконечний, к.т.н. К.В. Садовий,  
к.т.н. С.В. Орехов, І.М. Крикльовенко  
(подав д.т.н., проф. Ю.Л. Сімонов)

*Розглядається питання рішення однієї з головних задач при розпізнаванні класів повітряних цілей – отримання еталонних радіолокаційних дальнісних портретів макетів повітряних цілей для створення банку даних, за допомогою розробленого на базі Харківського військового університету експериментального вимірювального комплексу. Викладено один із можливих способів одержання таких радіолокаційних характеристик в безлунової камері при використанні зондуючого сигналу з лінійно-частотною модуляцією (ЛЧМ) та обробці відбитого від цілі сигналу сучасними алгоритмами цифрового спектрального аналізу.*

**Постановка проблеми та аналіз літератури.** З аналізу військових конфліктів останніх років [1], де в умовах масованих нальотів кількість цілей досягала сотень, стало зрозуміло, що з застосуванням перешкод і хибних цілей, а також обмеженого ресурсу засобів поразки, різко ускладнюється задача керування силами і засобами протиповітряної оборони (ППО). Тому обмежена пропускна здатність існуючого парку зенітних ракетних систем є одним із вирішальних факторів при оцінці ефективності систем ППО. Одним із можливих шляхів рішення цієї проблеми є введення режиму розпізнавання класу повітряних цілей (ПЦ) не тільки в засоби цілеуказання, але й до радіолокаційних станцій супроводження зенітно-ракетних комплексів (ЗРК), здатних виконувати бойову задачу при втраті централізованого керування в автономному децентралізованому режимі.

Відомо, що розпізнавання класу, а тим більше типу цілі, дозволить на 20 – 40 відсотків підвищити ефективність впливу на них різних засобів угруповань ППО, з більшою вірогідністю розкрити задум дій противника, організувати розподіл і знищення найбільш важливих цілей, з максимальною ефективністю реалізувати бойові можливості озброєння за рахунок оптимізації алгоритмів целерозподілу і порядку обстрілу цілей як в окремих ЗРК, так і в угрупованнях ППО.

Радіолокаційне розпізнавання – це одержання радіолокаційних характеристик різних об'єктів, вибір найбільш інформативних ознак і прийняття

рішення про приналежність цих об'єктів до певного класу та типу [2]. Інформація про радіолокаційні характеристики об'єктів може бути отримана методами як активної, так і пасивної локації. Радіолокаційними характеристиками, признаками розпізнавання при активній локації є ефективна поверхня розсіювання, спектральні і часові характеристики відбитих від цілі сигналів, що мають інформацію про параметри руху цілі, її форму, розмір. Але на думку багатьох сучасних науковців [3] найбільш інформативним признаком розпізнавання є радіолокаційний дальнісний портрет (РЛДП) цілі. Задачею розпізнавання є одержання таких портретів. Маючи раніше отримані портрети (еталони) і порівнюючи їх з вимірними РЛДП під час опромінення цілі, з'являється можливість високовирогідного розпізнавання класу та типу цілі.

**Мета статті.** Метою даної статті є описання способу виміру таких важливих для рішення задачі розпізнавання класів повітряних цілей радіолокаційних характеристик, як радіолокаційні дальнісні портрети, виміряні в спектральній області за допомогою сучасних алгоритмів цифрового спектрального аналізу (ЦСА), зокрема алгоритму Кейпона.

**Аналіз можливих способів моделювання радіолокаційних характеристик повітряних цілей при вимірі їх радіолокаційних дальнісних портретів сучасними методами цифрового спектрального аналізу.** З розвитком радіолокаційної техніки, збільшенням розрізнявальної здатності і зниженням апаратурних похибок виміру радіолокаційних характеристик (РЛХ) повітряних цілей стало ясно, що необхідно вводити поняття складної (протяжної) цілі, що складається з окремих елементарних відбивачів (центрів розсіювання). На цій основі було введено поняття локальних РЛХ, що визначають властивості окремих елементарних відбивачів зондуючого сигналу радіолокаційних станцій (РЛС).

При наявності каталогу РЛХ цілей мається принципова можливість знаходження аналітичним шляхом значення параметрів відбитого сигналу для будь-якої РЛС із відомими технічними показниками при заданих умовах спостереження. Одержати такий каталог можна за допомогою моделювання.

При рішенні практичних задач під моделюванням розуміється метод дослідження властивостей об'єкта (оригіналу) за допомогою вивчення властивостей іншого об'єкта (моделі), який являється більш зручним для рішення задач дослідження і знаходиться у визначеній відповідності з першим об'єктом [2]. Розрізняють два основних способи моделювання: математичне і фізичне моделювання. Основою дослідження для рішення задач математичного моделювання процесу виміру радіолокаційних характеристик ПЦ є чисельні методи. Для одержання РЛДП ПЦ необхідно

використання електронно-обчислювальної техніки (ЕОТ). Основними недоліками, що виявляються при реалізації методів математичного моделювання процесу виміру РЛДП ПЦ, на засобах ЕОТ є:

- обмежена точність уявлення поверхні імітаційних моделей ПЦ (а в ряді випадків неповна визначеність у математичному описі цих поверхонь);
- складність і неоднозначність рішення електродинамічної задачі взаємодії імітаційних моделей ПЦ із плоскою електромагнітною хвилею зондуючих сигналів (ЗС) (особливо у випадку моделей, що рухаються).

При фізичному моделюванні досліджувані процеси чи об'єкти відтворюються із збереженням їхньої фізичної природи (натурне моделювання), чи з використанням подібних фізичних явищ (масштабне моделювання).

Натурне моделювання процесу виміру РЛДП вимагає створення дорогих макетів РЛС, що опромінюють цілі. Для виміру РЛДП під різними ракурсами цілей необхідний або обліт цих цілей навколо РЛС, або переміщення макета РЛС навколо цілі, розташованої на землі. У першому випадку вимір РЛДП буде дуже дорогим процесом, а в другому – практично не зважається задача відбиття відображень від землі і місцевих предметів, що заважають якісному обміру цілі.

Масштабне моделювання характеризується насамперед тим, що дослідження проводяться на фізичних моделях, що володіють фізичною подобою, тобто зберігають цілком, чи хоча б в основному, природу явищ. Прикладом може служити ультразвуковий полігон (гідроакустичне моделювання) чи застосування безлунових камер надвисоких частот (електродинамічне моделювання) для дослідження процесів поширення радіохвиль.

Одним із суттєвих недоліків, властивих методам статистичних вимірювань на зменшених моделях цілей, є складність отримання РЛДП радіолокаційних цілей великих розмірів в діапазоні хвиль РЛС. З метою подолання цих труднощів можна використовувати електромагнітні хвилі оптичного діапазону і звукові хвилі.

Оптичними методами можна визначити місцезнаходження дискретного джерела вторинного випромінювання. Однак за допомогою методів цієї групи трудно отримати кількісні оцінки РЛДП з достатньою точністю. Це пояснюється якісними відмінностями процесів розсіювання світлових хвиль і радіохвиль. Використовуючи для отримання РЛДП ПЦ гідроакустичне моделювання, неможливо забезпечити лінійну поляризацію хвиль зондуючого сигналу. Крім того, при обмежених розмірах ультразвукового полігону особливу складність в отриманні РЛДП викликає компенсація перевідбиття сигналу від бокових стін полігону.

Тому електродинамічне моделювання є основним методом одержання РЛДП різних засобів повітряного нападу (ЗПН) у діапазоні над-

високих частот. При виконанні вимог електродинамічної подоби в одержуваних результатах враховуються нелінійності тракту проходження сигналу й ефекти перевідбиття сигналу, внесок яких практично неможливо оцінити іншими методами.

У якості моделей застосовують точні зменшені копії радіолокаційних цілей, які досліджуються. При цьому розміри моделі  $l_m$  і цілі  $l_c$ , а також довжини хвиль  $\lambda_m$ , сигналів  $\lambda$ , якими відрізняються модель РЛС і реальна РЛС відповідно, повинні бути такими, щоб виконувалася умова

$$l_m / l_c = \lambda_m / \lambda. \quad (1)$$

Існують два основних обмеження, які складають труднощі вимірювання РЛДП об'єктів великих розмірів відносно довжини хвилі поля РЛС: падаюча хвиля в місті розташування об'єкту повинна бути плоскою, амплітуда відбитої хвилі повинна вимірюватись на достатньо великому віддаленні від об'єкту, що розсіює.

Таким чином, для зменшення похибок при одержанні РЛДП необхідно забезпечити плоский фронт хвилі, що опромінює модель; тобто модель потрібно розташовувати на мінімально припустимій відстані від передавальної антени [4]:

$$r_{\min \text{ пер}} = D/4 + D/2 \times (D/\lambda), \quad (2)$$

де  $r_{\min \text{ пер}}$  – мінімально припустима відстань від передавальної антени до об'єкта опромінювання;  $D$  – розмір апертури передавальної антени;  $\lambda$  – довжина хвилі, що опромінює ціль.

Для виконання другої умови повинно виконуватись наступне:

$$r_{\min \text{ пр}} = l_{\max} / 4 + l_{\max} / 2 \times (l_{\max} / \lambda), \quad (3)$$

де  $r_{\min \text{ пр}}$  – мінімально допустима відстань від об'єкта опромінювання до приймальної антени РЛС;  $l_{\max}$  – максимальний розмір елемента конструкції моделі.

У разі суміщеної РЛС вибирають більше з двох значень  $r_{\min \text{ пер}}$  та  $r_{\min \text{ пр}}$ .

Для зменшення похибок виміру, обумовлених паразитними відображеннями, модель, як правило, розташовують у безлуновій камері (БЛК), основною задачею якої є ослаблення до необхідної величини відображень від поверхонь, що обмежують її обсяг. Так створюються умови "вільного простору" усередині замкнутого обсягу, при якому поле джерела не спотворюється за рахунок відображень.

Для одержання більш точних вимірів РЛДП у БЛК доцільно їх екранування з метою зниження загального рівня електрорадіозавад. Гарантований малий рівень відбитого сигналу при проведенні вимірів у БЛК є її основною характеристикою і називається коефіцієнтом безлуновості (КБ).

Для одержання РЛДП ПЦ була використана БЛК, яка має радіопоглинаючий матеріал (РПМ) розсіюючого типу, що характеризується знач-

ною поперечною неоднорідністю і може бути умовно об'єднаний класом шиповидних РПМ, що розсіюють. Поглинання радіохвиль у таких матеріалах відбувається при їхньому багаторазовому перевідбитті.

**Опис експериментального вимірювального комплексу.** В експериментальному вимірювальному комплексі (ЕВК) для вимірювання РЛДП ПЦ у якості широкосмугового зонduючого сигналу було обрано лінійно-частотномодульований сигнал.

Основна мета експерименту – одержання РЛДП макетів повітряних цілей, поміщених у БЛК за допомогою сучасних алгоритмів ЦСА.

На рис. 1 представлена структурна схема такого ЕВК, за допомогою якого стало можливим одержувати РЛДП макетів повітряних цілей у спектральній області, заносити отримані РЛДП у довгостроковий запам'ятовуючий пристрій з метою створення банк еталонних РЛДП макетів ПЦ.

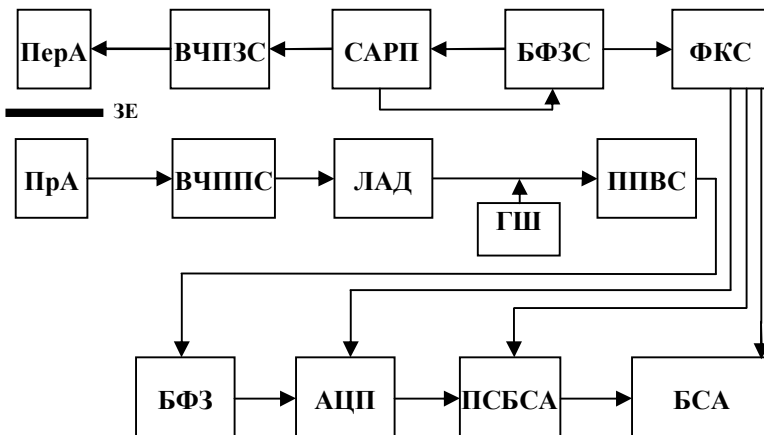


Рис. 1. Структурна схема експериментально-вимірювального комплексу

До складу основних блоків експериментального вимірювального комплексу входять (рис. 1): ФКС – формувач керуючих сигналів; БФЗС – блок формування зондувальних ЛЧМ сигналів; САРП – система автоматичного регулювання потужності; ВЧПЗС – високочастотний підсилювач зонduючих сигналів; ПерА – передавальна антена; ЗЕ – загороджувальний екран; ПрА – приймальна антена; ВЧППС – малoshумний високочастотний підсилювач прийнятого сигналу; ЛАД – лінійний амплітудний детектор; ГШ – генератор шуму; ППВС – пристрій посилення виділеного сигналу; БФЗ – блок фазового зсуву і сполучення з аналого-цифровим перетворювачем; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ПУБСА – пристрій узгодження з блоком спектрального аналізу; БСА – блок спектрального аналізу.

Принцип отримання РДП цілі пояснюється на рис. 2, де суцільною, пунктирною і штрих-пунктирною лініями показані закони зміни частоти відповідно зондувального і відбитих від двох блискучих точок (БТ) цілі ЛЧМ сигналів.

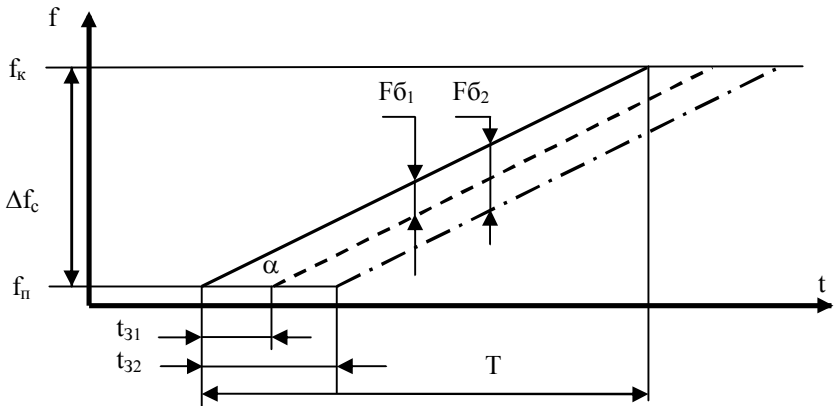


Рис. 2. Принцип одержання РДП об'єкта, що опромінюється в спектральній області

На рис. 2 прийняті наступні позначення:  $T$  – тривалість ЛЧМ радіоімпульсу;  $\Delta f_c$  – девіація частоти зондувального ЛЧМ сигналу;  $f_p$  і  $f_k$  – початкове і кінцеве значення частот зондувального ЛЧМ сигналу;  $\text{tg}\alpha = \Delta f_c/T$  – крутість зміни частоти ЛЧМ радіоімпульсу;  $t_{31(2)}$  – час затримки відбитого сигналу від першої (другої) блискучої крапки щодо зондувального (гетеродинного) ЛЧМ сигналу;  $F_{б1(2)}$  – різницева частота биттів між частотою зондувального сигналу і відбитого сигналу від першої (другої) БТ.

Робота експериментального вимірювального комплексу здійснюється таким чином. Пристрій формування ЛЧМ сигналів (ФКС і БФЗС) завдяки наявності системи САРП формує періодичну послідовність зондувальних сигналів постійної потужності (рис. 1). Система САРП сприяє вирівнюванню амплітудно-частотної характеристики спектра зонduючого сигналу. Зондувальний ЛЧМ сигнал з початковою частотою  $f_p$  і девіацією частоти  $\Delta f_c$  після посилення порядку 30Дб у ВЧПЗС (лампа біжучої хвилі) випромінюється в простір за допомогою передавальної рупорної антени ПерА.

Сформований ЛЧМ сигнал доходить до поверхні об'єкта, що опромінюється, відбивається від нього і повертається до приймальної антени. У той же час з виходу передавальної антени на вхід приймальної антени надходить проникаючий сигнал, граючи роль гетеродинного сигналу.

Для зменшення потужності проникаючого сигналу використовується загороджувальний екран ЗЕ (рис. 1), у якості якого використовується металева пластина прямокутної форми з розмірами  $0,7 \times 0,8$  м, що розташовується між приймальною і передавальною антенами. Після посилення по потужності у ВЧППС (лампа біжучої хвилі) із коефіцієнтом підсилення КР порядку 30 Дб відбитий і проникаючий сигнали детектуються на амплітудному детекторі ЛАД, на ньому відбувається виділення частот биття між проникаючим та відбитими сигналами. Виділені на ЛАД гармонійні коливання підсилюються блоком ППВС. При проведенні різного роду експериментів необхідно робити зміну величини відношення сигнал/шум ( $q$ ) на виході приймального тракту експериментального вимірювального комплексу. Зміна величини  $q$  забезпечується шляхом штучного збільшення рівня вихідних шумів. Для цього використовується генератор шуму ГШ, вихідна потужність якого плавно змінюється в діапазоні 1 ... 25 Дб.

ППВС дозволяє підсилювати продетектований сигнал з декількох мілівольт до рівня порядку 2 ... 3 В, який потрібен для роботи АЦП.

Для запобігання втрати інформації сигнал розділяється на основний і квадратурний (з зсувом на  $90^\circ$ ) канали в блоці БФЗ, а потім перетворюється до цифрового виду в АЦП. Оцифрований сигнал з АЦП надходить на пристрій сполучення з блоком спектрального аналізу ПСБСА.

ПСБСА зроблено у вигляді окремого модулю і включає в себе систему реєстрів зсуву і дешифратор адреси, які з'єднані з магістралями адресів і даних ЕОМ експериментального вимірювального комплексу. У блоці ПСБСА здійснюється переадресація оцифрованого сигналу по відповідних шинах адреси і даних ЕОМ блоку спектрального аналізу БСА.

У БСА здійснюється спектральна оцінка сигналів, що вимірюються відповідно до різних алгоритмів цифрового спектрального аналізу (ЦСА), зокрема згідно алгоритму Фур'є (4) і сучасному алгоритму ЦСА – алгоритму Кейпона (5):

$$S(\Omega) = X^*(\Omega) \times \Phi \times X(\Omega); \quad (4)$$

$$S(\Omega) = [X^*(\Omega) \times \Psi \times X(\Omega)]^{-1}, \quad (5)$$

де  $X(\Omega) = \{1; e^{-j\Omega\Delta t}; e^{-j2\Omega\Delta t}; \dots; e^{-j(M-1)\Omega\Delta t}\} = \{x_i(\Omega)\}$ ,  $i = \overline{1, M}$  –  $M$ -мірний вимірювальний вектор огляду;  $\Psi = \{w_{ij}\} = \Phi^{-1}$ ,  $i, j = \overline{1, M}$  –  $M \times M$  ермітова матриця, зворотна кореляційній матриці;  $\Phi = \{f_{ij}\} = \overline{Y Y^*}$ ,  $i, j = \overline{1, M}$  – кореляційна матриця  $M$ -мірного вектора відліків комплексних амплітуд  $Y = \{y_i\}$ ,  $i = \overline{1, M}$  аналізованого процесу;  $\Omega$  – поточне значення частоти; (\*) і риска зверху – символи ермітового сполучення і статистичного усереднення відповідно.

Отримані значення РЛДП макетів ПЦ у спектральній області  $S(\Omega)$  заносяться в довгострокову пам'ять, а отримані спектрограми відображаються на моніторі експериментального вимірювального комплексу. Блок спектрального аналізу БСА виконано на базі персональної ЕОМ. Спектральний аналіз відбитого сигналу виконується спеціально розробленою програмою "EKSPER", за допомогою якої здійснюється обробка прийнятих сигналів для отримання РЛДП макетів ПЦ у спектральній області за різними алгоритмами ЦСА (4 та 5), а також запис отриманих РДП у довгостроковий запам'ятовуючий пристрій та порівняння їх із еталонами.

**Висновки.** Таким чином, у запропонованому ЕВК, застосовуючи сучасні алгоритми спектрального аналізу, що мають високу розрізняльну здатність, стало можливим одержання РЛДП моделей ПЦ у спектральній області і створення банку еталонних портретів для їх подальшого розпізнавання. Для одержання таких портретів необхідно використання ЛЧМ зондуючого сигналу з великою дев'яцією частоти, що в свою чергу потребує зміни приймально-передавальних трактів існуючого парку озброєння. Щоб вирішити цю проблему, слід використовувати надрозрізняючі алгоритми спектрального аналізу, такі як, наприклад алгоритм Кейпона, котрий дозволяє при високому відношенні сигнал/шум без суттєвої зміни приймально-передавальних трактів існуючих зразків озброєння, підвищити розрізняючу здатність за дальністю у декілька разів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Седов Ю.Л. *Ближний восток: спираль милитаризации // Зарубежное военное обозрение.* – 1990. – № 9. – С. 10 – 16.
2. Небабин В.Г., Сергеев В.В. *Методы и техника радиолокационного распознавания.* – М.: Радио и связь, 1984. – 121 с.
3. *О первых отечественных исследованиях по сверхширокополосной радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Б. Алмазов, В.Б. Голико и др. // Радиотехника и электроника.* – 1991. – № 1. – С. 96 – 100.
4. Сазонов Д.М. *Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотех. спец. вузов.* – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.

Надійшла 17.11.2004

**НАКОНЕЧНИЙ Володимир Сергійович**, канд. техн. наук, ст. викладач кафедри Харківського університету ПС. Область наукових досліджень – радіотехніка.

**САДОВИЙ Костянтин Віталійович**, канд. техн. наук, викладач кафедри Харківського університету ПС. Область наукових інтересів – радіотехніка.

**ОРЕХОВ Сергій Васильович**, канд. техн. наук, заступник начальника кафедри Харківського університету ПС. Область наукових досліджень – радіотехніка.

**КРИКЛИВЕНКО Ігор Миколайович**, викладач кафедри Харківського університету ПС. Область наукових досліджень – радіотехніка.