

УДК 621.396.96

Є.Л. Казаков¹, О.Є. Казаков², О.В. Коломійцев³, С.І. Клівець³¹ Академія наук прикладної радіоелектроніки, Харків² Харківська державна академія культури, Харків³ Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

МЕТОД ОТРИМАННЯ ОЗНАКИ РОЗПІЗНАВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ЦІЛІ ПРИ ОБРОБЦІ ОСНОВНОЇ І КРОСОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ВІДБИТОГО БАГАТОЧАСТОТНОГО СИГНАЛУ З УРАХУВАННЯМ РІЗНИЦІ ФАЗ МІЖ НИМИ

Отримано вираз для комплексної огинаючої згортки імпульсних характеристик радіолокаційної цілі на основній і кросовій поляризаціях відбитих багаточастотних сигналів з урахуванням різниць фаз між ними. Розглянута структурна схема пристрою, що реалізовує цій вираз.

Ключові слова: радіолокаційна ціль, імпульсна характеристика, поляризація сигналу, багаточастотний сигнал.

Вступ

Постановка проблеми і аналіз літератури.

До теперішнього часу в науково-технічній літературі велика увага приділяється питанням набуття ознак розпізнавання радіолокаційних цілей при використанні різних видів сигналів. Зокрема, в літературі [1, 2] детально розглянуті методи набуття ознак розпізнавання цілей по їх поляризаційних відмінностях, а також при використанні відбитих некогерентних багаточастотних сигналів [3, 4].

Проте, більшість проведених раніше досліджень передбачає для набуття ознак розпізнавання цілей проведення незалежної обробки відбитих некогерентних багаточастотних сигналів або сигналів на різних поляризаціях. Це при можливості в РЛС приймати відбиті багаточастотні сигнали на різних поляризаціях приведе до втрати частини інформації в отриманих ознаках розпізнавання, оскільки вноситься погрішність за рахунок наявності в кожній частотній складовій зондуючого сигналу випадкової початкової фази. Методом виключення цієї початкової фази при обробці таких сигналів уваги не приділялося. Таким чином розробка нового методу отримання ознаки розпізнавання цілі, що спостерігається за рахунок спеціальної спільної обробки основної і кросової компонент відбитого багаточастотного сигналу з урахуванням різниці фаз є актуальною науково-технічною задачею.

Мета статті: розробка методу спільної обробки основної і кросової поляризацій відбитого від цілі багаточастотного сигналу з урахуванням різниці фаз між ними для отримання нової ознаки розпізнавання.

Основний матеріал

Розглянемо гіпотетичну РЛС, випромінюючу багаточастотний сигнал основної поляризації і при-

ймаючи відбитий від цілі, що спостерігається сигнал на основній і кросовій поляризації. В цьому випадку в кожній частотній складовій відбитого сигналу будуть міститися випадкова початкова фаза β_k (k – кількість частотних складових).

Розглянемо можливості виключення цієї випадкової фази при отриманні ознаки розпізнавання цілі в результаті спільної обробки основної і кросової складових відбитих сигналів. Представимо цілі радіолокації у вигляді сукупності μ відбиваючих елементів [4] з яких 1 деполіризують сигнал при відбитті. Тоді частотні характеристики цілі на частоті f для основної і кросової поляризацій приймаемого РЛС сигналу можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{U}_o(j2\pi f) &= \sum_{i=1}^{\mu} \dot{S}_{oi} e^{-j2\pi f \tau_i}; \\ \dot{U}_{кр}(j2\pi f) &= \sum_{p=1}^1 \dot{S}_{кр,p} e^{-j2\pi f \tau_p}, \end{aligned} \quad (1)$$

де \dot{S}_{oi} , $\dot{S}_{кр,p}$ – комплексні коефіцієнти відбиття i -го і p -го відбивачів цілі на основній і кросовій поляризаціях; τ_i , τ_p – час запізнювання сигналу від умовного центру цілі до i -го (p -го) відбивача і зворотно. Частотним характеристикам цілі в часовій області представимо у відповідність імпульсні характеристики:

$$\begin{aligned} B_{\infty o}(t) &= \sum_{i=1}^{\mu} \dot{S}_{oi} \delta(t - \tau_i); \\ B_{\infty кр}(t) &= \sum_{p=1}^1 \dot{S}_{кр,p} \delta(t - \tau_p), \end{aligned} \quad (2)$$

передбачалася слабка частотна залежність комплексних коефіцієнтів відбиття \dot{S}_{oi} і $\dot{S}_{кр,p}$, а дельта-функція $\delta(t - \tau_{i(p)})$ локалізована в точці τ_i (τ_p) на часовій осі.

Частотний спектр відбитого сигналу $\dot{V}(j2\pi f)$, пов'язаний із спектром зондуючого сигналу $\dot{Z}(j2\pi f)$ і частотною характеристикою цілі $\dot{U}(j2\pi f)$ співвідношенням:

$$\begin{aligned} \dot{V}_o(j2\pi f) &= \dot{Z}(j2\pi f) \dot{U}_o(j2\pi f); \\ \dot{V}_{кр}(j2\pi f) &= \dot{Z}(j2\pi f) \dot{U}_{кр}(j2\pi f). \end{aligned} \quad (3)$$

Перемноження частотних спектрів відбитих сигналів матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{V}_o(j2\pi f) \dot{V}_{кр}(j2\pi f) &= \\ &= |\dot{Z}(j2\pi f)|^2 \dot{U}_o(j2\pi f) \dot{U}_{кр}^*(j2\pi f). \end{aligned} \quad (4)$$

Далі точки в позначеннях комплексних параметрів опустимо.

Нехай у якості зондуючого сигналу використовується багаточастотний сигнал (БЧС) із спектром:

$$Z(j2\pi f) = \sum_{k=1}^M e^{-j\pi\tau_k} \frac{\sin \pi(f - f_k)\tau_k}{\pi(f - f_k)} e^{-j\beta_k}, \quad (5)$$

де β_k – випадкова початкова фаза k -ої складової БЧС.

Покажемо, що незважаючи на наявність в зондуючому сигналі випадкової початкової фази β_k , при відповідній обробці можна отримати інформативну, з точки зору розпізнавання цілі, ознаку – фазу відбитого сукупністю відбиваючих елементів цілі сигналу.

Візьмемо зворотне перетворення Фур'є від правої і лівої частин виразу (4) і отримаємо вираз:

$$\Gamma^{-1} \{V_o(j2\pi f) V_{кр}^*(2\pi f)\} = V_o$$

де V_o – взаємна кореляційна функція (ВКФ) відбитих сигналів на основній і кросовій поляризаціях;

Γ^{-1} – знак застосування зворотного перетворення Фур'є. В цьому випадку після деяких перетворень маємо:

$$\begin{aligned} V(t) &= \Gamma^{-1} \left\{ |Z(j2\pi f)|^2 U_o(j2\pi f) U_{кр}^*(j2\pi f) \right\} = \\ &= \sum_{k=1}^M \int_0^\infty e^{j2\pi ft} \frac{\sin^2 \pi(f - f_k)\tau_k}{[\pi(f - f_k)]^2} \times \\ &\times U_o(j2\pi f) U_{кр}^*(j2\pi f) df. \end{aligned} \quad (6)$$

При виведенні цього виразу враховано, що кожна частотна складова випромінюється зі своєю початковою фазою β_k , яка є випадковою величиною, розподіленою, наприклад, рівноімовірно на інтервалі $0 \dots 2\pi$.

Тому при усередненні по випадковому параметру β у виразі (6) початкова фаза, присутня у відбитому сигналі як на основній, так і на кросовій поляризаціях зникає.

Ця обставина дозволяє сформувати таку ознаку розпізнавання, яка, як показано нижче, враховує

не лише амплітудну, але і фазову інформацію про ціль. Якщо випромінюється протяжний за часом сигнал, то його спектр можна представити у вигляді лінійчатого:

$$Z(j2\pi f) = \sum_{k=1}^M \delta(f - f_k).$$

Для цього сигналу вираз (6) з урахуванням (1) можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} V(t) &= \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^\mu \sum_{p=1}^1 S_{oiкр,p} \times \\ &\times e^{-j2\pi f_o(\tau_i - \tau_p)} e^{j2\pi k\Delta f [t - (\tau_i - \tau_p)]} \times \\ &\times e^{i2\pi f_o t} = Y(t) e^{j2\pi f_o t}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $Y(t)$ – огинаюча ВКФ, відбитого сигналу на основній і кросовій поляризаціях;

$$f_k = f_o + k\Delta f,$$

де f_o – несуча частота першої частотної складової БЧС; Δf – рознесення частот між сусідніми складовими БЧС;

$$\begin{aligned} Y(t) &= \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^\mu \sum_{p=1}^1 S_{oiкр,p} \times \\ &\times e^{-j2\pi f_o(\tau_i - \tau_p)} e^{j2\pi k\Delta f [t - (\tau_i - \tau_p)]}. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким чином, отримаємо вираз для комплексної огинаючої ВКФ відбитого сигналу, що приймається на основній і кросовій поляризаціях, яке зв'язує параметри цілі (число відбиваючих елементів, відстань між ними, коефіцієнти відбиття на основній і кросовій поляризаціях) та параметри сигналу (число частот БЧС, рознесення частот між сусідніми складовими БЧС).

Можна показати, що огинаюча ВКФ відбитого від цілі сигналу, що приймається на основній і кросовій поляризаціях, зводиться до огинаючої згортки імпульсної характеристики цілі, визначених на основній і кросовій поляризаціях.

З цією метою повернемося до виразу (7) і запишемо зворотне перетворення Фур'є від твору частотних характеристик цілі на основній і кросовій поляризаціях, тобто згортку відповідних імпульсних характеристик:

$$\begin{aligned} \Gamma^{-1} \{U_o(j2\pi f) U_{кр}^*(j2\pi f)\} &= \\ &= \int_0^\infty \sum_{i=1}^\mu S_{oi} e^{-j2\pi f\tau_i} \sum_{p=1}^1 S_{кр,p} e^{-j2\pi f\tau_p} e^{j2\pi ft} df = \\ &= \sum_{k=1}^M e^{j2\pi f_k t} \sum_{i=1}^\mu S_{oi} e^{-j2\pi f_k \tau_i} \sum_{p=1}^1 S_{кр,p} e^{-j2\pi f_k \tau_p} = \\ &= \sum_{i=1}^\mu \sum_{p=1}^1 S_{oi} S_{кр,p} e^{-j2\pi f_o [t - (\tau_i - \tau_p)]} \times \\ &\times \sin \pi M \Delta f [t - (\tau_i - \tau_p)] / \sin \pi \Delta f [t - (\tau_i - \tau_p)] \times \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 & \times e^{j(M-1)\pi\Delta f [t - (\tau_i - \tau_p)]} = X(t) e^{-j2\pi f_0 t}, \\
 & X(t) = \sum_{i=1}^{\mu} \sum_{p=1}^1 S_{oi} S_{кр,p} e^{-j2\pi f_0 (\tau_i - \tau_p)} \times \\
 \text{де} & \times e^{j(M-1)\pi\Delta f [t - (\tau_i - \tau_p)]} \frac{\sin \pi M \Delta f [t - (\tau_i - \tau_p)]}{\sin \pi \Delta f [t - (\tau_i - \tau_p)]}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

При виведенні виразу (9) інтеграл в частотній області в нескінченних межах замінений сумою M складових, оскільки спектр зондуючого сигналу обмежений.

Порівнюючи вирази (8) і (9), можна зробити висновок, що комплексну огинаючу ВКФ сигналу, що приймається на основній і кросовій поляризаціях у разі використання протяжного за часом БЧС, що має обмежений лінійчастий спектр, можна покласти рівної комплексної огинаючої зворотки імпульсних характеристик на основній і кросовій поляризаціях. Згортку імпульсних характеристик цілі на основній і кросовій поляризаціях можна інтерпретувати також таким чином:

$$\begin{aligned}
 & \Gamma^{-1} \{ U_o(j2\pi f) U_{кр}^*(j2\pi f) \} = \\
 & = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^{\mu} S_{oi} e^{-j2\pi f \tau_i} \sum_{p=1}^1 S_{кр,p} e^{j2\pi f \tau_p} e^{j2\pi f t} df = \quad (11) \\
 & = \sum_{k=1}^M e^{j2\pi f_k t} \sum_{i=1}^{\mu} S_{oi} e^{-j2\pi f_k \tau_i} \sum_{p=1}^1 S_{кр,p} e^{-j2\pi f_k \tau_p}.
 \end{aligned}$$

Проте:

$$\sum_{i=1}^{\mu} S_{oi} e^{j2\pi f_k \tau_i} \sum_{p=1}^1 S_{кр,p} e^{j2\pi f_k \tau_p} = S_{\Sigma_{ок}} S_{\Sigma_{кр,к}} e^{j\Delta\phi_k},$$

де $S_{\Sigma_{ок}}$ і $S_{\Sigma_{кр,к}}$ – компоненти амплітудно-частотних спектрів відбитого сигналу, що приймається на основній і кросовій поляризаціях на k -й частоті і відбиття, що враховують, від усіх відбиваючих елементів цілі; $\Delta\phi_k$ – різниця фаз між відповідними компонентами фазо-частотних спектрів відбитого сигналу на різних поляризаціях на k -й частоті. Таким чином отримуємо:

$$\begin{aligned}
 & \Gamma^{-1} \{ U_o(j2\pi f) U_{кр}^*(j2\pi f) \} = \\
 & = \Gamma^{-1} \{ U_o(j\omega) \} \otimes \Gamma^{-1} \{ U_k(j\omega) \} = \\
 & = \sum_{k=1}^M e^{j2\pi f_k t} S_{\Sigma_{ок}} S_{\Sigma_{кр,к}} e^{j\Delta\omega_k} = \\
 & = \sum_{k=1}^M S_{\Sigma_{ок}} S_{\Sigma_{кр,к}} e^{j(\Delta\omega_k + 2\pi k \Delta f t)} e^{j2\pi f_0 t} = X(t) e^{j2\pi f_0 t}.
 \end{aligned}$$

Тоді модуль імпульсних характеристик цілі, що огинають згортки, на основній і кросовій поляризаціях рівний:

$$\begin{aligned}
 X(t) & = \left| \sum_{k=1}^M S_{\Sigma_{ок}} S_{\Sigma_{кр,к}} e^{j(\Delta\omega_k + 2\pi k \Delta f t)} \right| = \\
 & = \sqrt{ \left[\sum_{k=1}^M S_{\Sigma_{ок}} S_{\Sigma_{кр,к}} \cos(2\pi k \Delta f t + \Delta\phi_k) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^M S_{\Sigma_{ок}} S_{\Sigma_{кр,к}} \sin(2\pi k \Delta f t + \Delta\phi_k) \right]^2 }. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Отриманий у виразі (12) модуль комплексної огинаючої зворотки імпульсних характеристик цілі на основній і кросовій поляризаціях може бути використаний в якості ознаки розпізнавання, що враховує відбивні та деполаризуючі властивості одночасно.

На рис. 1 показана структурна схема облаштування отримання квадрата модуля огинаючої зворотки імпульсних характеристик цілі, визначуваних на основній і кросовій поляризаціях сигналу, що приймається.

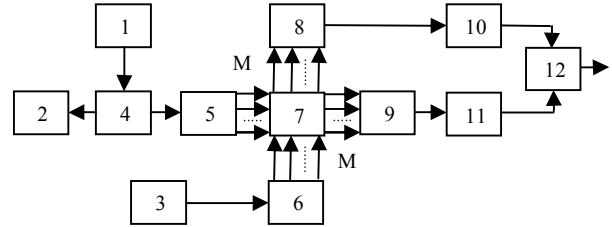


Рис. 1. Структурна схема пристрою отримання квадрата модуля згортки

Пристрій складається з передавача БЧС 1, антен основного 2 і кросового 3 каналів прийому, антенного перемикача 4, підсилювачів високої частоти (ПВЧ) основного 5 і кросового 6 каналів, блоку розрахунку зворотки імпульсних характеристик 7, суматорів 8 і 9, квадраторів 10 і 11 та суматора 12.

Робота цього пристрою полягає в наступному. БЧС з виходу передавача 1 через антенний перемикач 4 поступає на антену 2 та випромінюється.

Відбитий від цілі сигнал з виходу антени 2 основного каналу прийому в режимі прийому поступає через антенний перемикач 4 на вхід ПВЧ 5 і підсилюється.

Аналогічним чином, з виходу антени 3 кросові канали прийому відбитий сигнал на кросовій поляризації поступає на вхід ПВЧ 6.

З виходів ПВЧ 5 і 6 кожен з БЧС (по числу частотних складових) поступає на основній і кросовій поляризаціях на відповідні входи блоку розрахунку зворотки імпульсних характеристик цілі 7, який утримує відповідні канали 13 (число цих каналів також дорівнює числу випромінюваних БЧС).

Структурна схема каналу блоку розрахунку згортки 13 приведена на рисунку 2.

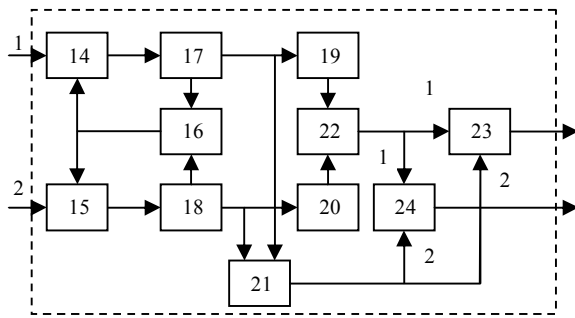


Рис. 2. Структурна схема каналу блока розрахунку зворотки

Цей блок складається зі змішувачів 14 і 15 основного і кросового каналів прийому гетеродину 16, підсилювачів проміжної частоти (ППЧ) 17 і 18, амплітудних детекторів 19 і 20, фазового детектора 21, помножувача 22, а також першого та другого процесорів 23 і 24.

Робота цього каналу полягає в наступному. На перший і другий входи каналу поступають сигнали з виходів ПВЧ 5 і 6 основного блоку. У змішувачах 14 і 15 цих сигналів перетворюються на проміжну частоту, а потім посилюються ППЧ 17 і 18.

Амплітудні детектори 19 і 20 формують на своїх виходах напруги, пропорційні k -им частотним складовим амплітудно-частотного спектру сигналу, що приймається, на основній та кросовій поляризаціях.

Помножувач 22 перемножує цю напругу та подає її на перші входи процесорів 23 і 24.

Фазовий детектор 21, у свою чергу, формує на виході напругу, пропорційну різниці фаз між k -ми компонентами фазочастотного спектру БЧС на основній і кросовій поляризаціях, та передає її на другі входи процесорів 23 і 24.

Вихід процесора 23 є k -им першим виходом каналу блоку розрахунку квадратурних складових зворотки імпульсних характеристик цілі, де формується величина напруги:

$$S_{ок} S_{кр,к} \cos(2\pi\Delta ft + \Delta\omega_k).$$

На виході процесора 24 формується напруга, пропорційна:

$$S_{ок} S_{кр,к} \sin(2\pi\Delta ft + \Delta\omega_k).$$

Ця напруга відповідно через суматори 8 і 9, квадратори 10 і 11 та суматор 12 поступають на вихід основною і кросовою поляризаціях відбитого сигналу.

Висновки

Таким чином, розроблено метод і пристрій, що реалізовує його. Метод дозволяє шляхом спільної обробки основної і кросової поляризації відбитого багаточастотного сигналу, з урахуванням різниці фаз між ними, отримати нову ознаку розпізнавання цілі.

Список літератури

1. Селекция и распознавание на основе локационной информации. / Под. ред. Л.Я. Горелика. – М.: Радио и связь, – 1990. – 240 с.
2. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание объектов по поляризационным признакам / Е.Л. Казаков. – Одесса : ОИУМ, 1999. – 231 с.
3. Казаков Е.Л. Распознавание воздушных целей некоррелированному многочастотному сигналу с учетом поляризации в разных диапазонах длин волн / Е.Л. Казаков, Д.Г. Васильев, А.Е. Казаков. Под ред. Е.Л. Казакова. – Х.: Друкарня РУЗО Шведова Л.И., 2009. – 165 с.
4. Казаков Е.Л. Распознавание воздушных целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных локаторах / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, А.В. Коломийцев, К.В. Садовый. Под ред. Е.Л. Казакова. – Х.: Миськдрук, 2015. – 459 с.

Надійшла до редколегії 23.02.2016

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПРИЗНАКА РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОСНОВНОЙ И КРОССОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОТРАЖЕННОГО МНОГОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА С УЧЕТОМ РАЗНОСТИ ФАЗ МЕЖДУ НИМИ

Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, А.В. Коломийцев, С.И. Клевев

Получено выражение для комплексной огибающей свертки импульсных характеристик радиолокационной цели на основной и кроссовой поляризациях отраженных многочастотных сигналов с учетом разностей фаз между ними. Рассмотрена структурная схема устройства, реализующего данное выражение.

Ключевые слова: радиолокационная цель, импульсная характеристика, поляризация сигнала, многочастотный сигнал.

RECEIPT METHOD OF RADIO-LOCATION AIM RECOGNITION SIGN AT TREATMENT OF BASIC AND CROSS-COUNTRY RACE POLARIZATION OF THE REFLECTED MULTIFREQUENCY SIGNAL TAKING INTO ACCOUNT DIFFERENCE OF PHASES BETWEEN THEM

Ye.L. Kazakov, O.E. Kazakov, O.V. Kolomyicev, S.I. Klivec

Expression for complex circumflex convolution of impulsive descriptions of radio-location aim is got on basic and cross-country race polarizations of the reflected multifrequency signals taking into account the differences of phases between them. The flow diagram of device realizing this expression is considered.

Keywords: radio-location aim, impulsive description, polarization of signal, multifrequency signal.