

В.Д. Карлов¹, О.Л. Кузнецов¹, А.М. Артеменко²

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

² Генеральний штаб Збройних Сил України, Київ

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЦІЛІ ПРИ ВРАХУВАННІ КОРЕЛЬОВАНИХ ФЛУКТУАЦІЙ ПОЧАТКОВИХ ФАЗ РАДІОІМПУЛЬСІВ ПРИЙНЯТОЇ ПАЧКИ

У статті із загальних позицій теорії радіолокації розглянуто методологічні основи оцінювання радіальної швидкості при використанні когерентної пачки радіоімпульсів стосовно випадку наявності у відбитих від цілі радіоімпульсах корельованих флукуацій початкових фаз. Розгляд проводиться в припущенні, що на вхід приймального пристрою РЛС надходить адитивна суміш відбитих від цілей сигналів й некорельованого гаусівського шуму. Оцінювання доплеровського зміщення частоти відбитого від цілі сигналу здійснюється за критерієм максимуму натурального логарифма відношення правдоподібності усередненого по усім можливим значенням випадкових неінформативних параметрів. Вважається, що фазові флукуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом з нульовим середнім, а кореляція фазових флукуацій зі збільшенням інтервалу між радіоімпульсами пачки убуває за експоненціальним або знакозмінним законами. Отримано розподіл щільності імовірності випадкових складових різниць фаз симетричних радіоімпульсів пачки. Показано, що оптимальне оцінювання радіальної швидкості цілі пов'язано із оцінюванням даних різниць фаз. Врахування флукуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки при вимірюванні радіальної швидкості цілі дозволить покращити показники якості радіолокаційного спостереження складних, малопомітних та маневруючих цілей, а також забезпечить можливість проведення оптимізації часо-частотної обробки радіолокаційного сигналу в когерентно-імпульсних РЛС.

Ключові слова: когерентна пачка радіоімпульсів, радіальна швидкість, корельовані флукуації, початкова фаза, гаусівський шум, відношення правдоподібності, оптимальне вимірювання, радіолокаційне спостереження.

Вступ

Постановка проблеми. Досвід проведення війн та локальних конфліктів останнього часу вказує на широке використання сторонами конфліктів високошвидкісних та малопомітних засобів повітряного нападу (ЗПН), зокрема, безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [1–3].

Для радіолокаційного спостереження високошвидкісних та малопомітних цілей РЛС повинні забезпечувати вимірювання координат та їх похідних за часом з високою точністю і бути максимально мобільними. Однак, забезпечити виконання даних вимог в реальних умовах локації вказаних цілей досить складно, що обумовлено їхнім використанням на малих і гранично малих висотах, особливо над морською поверхнею [4–6]. Дана складність обумовлена виникненням у прийнятих радіолокаційних сигналах флукуацій початкових фаз.

Причинами виникнення даних флукуацій можуть бути: випадкові неоднорідності середовища поширення радіосигналу, складна форма цілі та багатотрасовість поширення радіосигналу.

Вказане свідчить про необхідність вдосконалення існуючих РЛС з метою максимального врахування реальних умов виконання завдань за призна-

ченням, тобто врахування викривлень фазового фронту хвилі при обробці радіолокаційного сигналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню оптимального оцінювання радіальної швидкості цілі при її локації під малими кутами місця присвячена значна кількість робіт [7–9]. В цих роботах обґрунтовано, що реальні умови поширення і відбиття сприяють спотворенню фазової структури радіолокаційного сигналу.

Турбулентність атмосфери призводить до флукуацій показника її заломлення, що викликає випадкові зміни фазової структури сигналу. У тропосфері дане явище обумовлене флукуаціями температури, вологості та тиску [10–12].

Рух реальної цілі призводить до зміни просторового положення складових її елементів, появи флукуацій сумарного відбитого сигналу [4–5; 10–11; 13] та виникнення корельованих флукуацій початкових фаз у відбитих від цілей радіоімпульсах.

Помилки вимірювання координат цілі та параметрів її руху, які обумовлені вказаними вище факторами, можуть досягати величин, які перевершують відповідні вимоги до РЛС різних типів [5; 7; 12].

В роботах [4–8] розглядається можливість врахування реальних умов роботи РЛС при локації маловисотних цілей. Однак, в цих роботах проаналізо-

вано можливість локації цілей при використанні поодиноких радіоімпульсів. При цьому, на практиці в дійсний час при вимірюванні радіальної швидкості цілі широко використовується когерентна пачка радіоімпульсів. Як відомо, в основі цієї операції лежить вимірювання частоти пачки радіоімпульсів. Фазові флуктуації прийнятого сигналу призводять до порушення його часової когерентності, що обмежує точність вимірювання даного параметра.

У свою чергу у відомій літературі не розглядався постановка завдання оптимального оцінювання радіальної швидкості цілі при використанні когерентної пачки з врахуванням корельованих флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів. Запропонована стаття присвячена усуненню цього недоліку.

Метою статті є розробка методологічних основ оптимального оцінювання радіальної швидкості цілі при використанні когерентної пачки в умовах наявності корельованих флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів.

Виклад основного матеріалу

Розглядається випадок, коли на вхід приймального пристрою РЛС надходить адитивна суміш відбитого від цілі корисного радіосигналу і некорельованого гаусівського внутрішнього шуму.

Вимірювання радіальної швидкості цілі здійснюється згідно з виразом

$$V_r = \frac{\lambda}{4\pi} \Omega, \quad (1)$$

де $\Omega = 2\pi F_d$ – циклічний доплерівський зсув частоти; F_d – частота Доплера; λ – довжина хвилі радіолокаційного сигналу.

Оцінювання доплерівського зсуву частоти здійснюється по максимуму відношення правдоподібності $\ell(\Omega)$ або його натурального логарифму.

Корисним радіосигналом є пачка, яка має n радіоімпульсів, з випадковою амплітудою b та початковою фазою β , що частково втратила когерентність, внаслідок реальних умов поширення та відбиття. Тому до фаз радіоімпульсів пачки додаються флуктуаційні складові φ_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Випадковий характер амплітуди b , початкової фази β пачкового радіосигналу і наявність флуктуаційних складових початкових фаз радіоімпульсів пачки φ_i викликають необхідність переходу до усередненого відношення правдоподібності по усім можливим значенням даних неінформативних параметрів [14].

Через незалежність b , β і φ_i , усереднення по кожному з них може бути проведено окремо і вираз відношення правдоподібності для параметру Ω приймає вид

$$\bar{\ell}(\Omega) = \int_b \int_\beta \int_{\vec{\varphi}} \ell(\Omega/b, \beta, \vec{\varphi}) p(b) p(\beta) p(\vec{\varphi}) db d\beta d\vec{\varphi}, \quad (2)$$

де $\ell(\Omega/b, \beta, \vec{\varphi})$ – умовне відношення правдоподібності при фіксованих випадкових неінформативних параметрах очікуваного радіосигналу; $\vec{\varphi} = \|\varphi_i\|$ – вектор-стовпець значень флуктуаційних складових початкових фаз радіоімпульсів пачки; $p(b)$, $p(\beta)$ і $p(\vec{\varphi})$ – щільності імовірності випадкової амплітуди, початкової фази пачкового радіосигналу і вектора-стовпця $\vec{\varphi}$ відповідно; $d\vec{\varphi} = (d\varphi_1 d\varphi_2 \dots d\varphi_n)^T$.

Задача оптимізації вимірювання доплерівського зсуву частоти пачки радіоімпульсів може бути вирішена шляхом знаходження аргументу максимуму натурального логарифму усередненого відношення правдоподібності (2) згідно виразу

$$\hat{\Omega} = \arg \max \ln \bar{\ell}(\Omega). \quad (3)$$

При прийомі когерентного сигналу з випадковою рівномірно розподіленою початковою фазою і випадковою, розподіленою за законом Релея, амплітудою на фоні некорельованого шуму, відношення правдоподібності відповідно до [14] має вид:

$$\ell = \frac{1}{1 + \frac{q^2}{2}} \exp \frac{\frac{q^4}{4}}{1 + \frac{q^2}{2}} \rho^2, \quad (4)$$

де q^2 – відношення сигнал-шум по потужності; ρ – нормована функція розузгодження по фазі спостережуваного і очікуваного радіосигналів.

В умовах регулярного вимірювання (відношення сигнал-шум по потужності $q^2 \gg 1$) відношення правдоподібності (4) визначається виразом

$$\ell \approx \frac{2}{q^2} \exp \frac{q^2 \rho^2}{2}. \quad (5)$$

У випадку когерентної пачки з n радіоімпульсів з постійним періодом проходження, квадрат нормованої функції розузгодження описується виразом

$$\rho^2(\Omega) = \left| \sum_{i=1}^n \xi_i \exp[jx_i(\Omega)] \right|^2, \quad (6)$$

де $\Omega = \omega - \omega_0$ – розузгодження між очікуваною циклічною частотою ω і спостережуваною циклічною частотою ω_0 пачки радіоімпульсів; i – номер радіоімпульсу, який відраховується від початку пачки ($i = 1, 2, \dots, n$); n – число радіоімпульсів у пачці;

$\xi_i = \frac{Z_i}{Z_\Sigma}$; Z_i – модуль сигнальної частини комплексного кореляційного інтеграла для i -го радіоімпу-

льсу; $Z_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Z_i$; $x_i(\Omega) = \Phi_i - \left(\frac{n+1-2i}{2}\right)\Omega$;
 Φ_i – значення спостережуваної початкової фази
 i -го радіоімпульсу; $\frac{n+1-2i}{2}\Omega$ – очікуваний дода-
 нок до початкової фази i -го радіоімпульсу, обумов-
 лений розузгодженням за частотою; T – період слі-
 дування радіоімпульсів пачки.

Узяттям модулю комплексного числа та отри-
 манням квадрату цього результату, вираз (6) при-
 ймає вид

$$\rho^2(\Omega) = \left[\sum_{i=1}^n \xi_i \cos x_i(\Omega)\right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n \xi_i \sin x_i(\Omega)\right]^2. \quad (7)$$

Застосуванням властивості квадрата суми
 $\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j$, вираз (7) перетворюється до
 виду

$$\begin{aligned} \rho^2(\Omega) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j [\cos x_i(\Omega) \cos x_j(\Omega) + \\ &\quad + \sin x_i(\Omega) \sin x_j(\Omega)] = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j \cos[x_i(\Omega) - x_j(\Omega)]. \end{aligned} \quad (8)$$

З урахуванням співвідношень

$$\begin{aligned} x_i(\Omega) &= \Phi_i - \left(\frac{n+1-2i}{2}\right)\Omega \\ x_j(\Omega) &= \Phi_j - \left(\frac{n+1-2j}{2}\right)\Omega, \end{aligned}$$

вираз (8) можна записати наступним чином

$$\rho^2(\Omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j \cos[(\Phi_i - \Phi_j) - \Omega T(i - j)]. \quad (9)$$

При малому розузгодженні спостережуваних та
 очікуваних значень початкових фаз радіоімпульсів
 пачки, під знаком подвійного сумування виразу (9)
 знаходиться косинус малого аргументу, для якого
 справедливим є співвідношення $\cos x \approx 1 - \frac{1}{2}x^2$.

Таким чином, вираз (9) приймає вид

$$\rho^2(\Omega) = 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j [(\Phi_i - \Phi_j) - \Omega T(i - j)]^2. \quad (10)$$

Після приведення подібних складових, вираз
 (10) приймає вид

$$\begin{aligned} \rho^2(\Omega) &= 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (\Phi_i - \Phi_j)^2 - \\ &\quad - \frac{1}{2} T^2 \Omega^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i - j)^2 + \\ &\quad + T \Omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i - j) (\Phi_i - \Phi_j). \end{aligned} \quad (11)$$

За наявності флукуаційних складових фаз φ_i
 $(i = 1, 2, \dots, n)$ радіоімпульсів пачки, множник $x_i(\Omega)$ у
 виразі (6) буде мати вид

$$x_i(\Omega) = \Phi_i + \varphi_i - \left(\frac{n+1-2i}{2}\right)\Omega. \quad (12)$$

За допомогою наведених вище математичних
 перетворень, при малому розузгодженні спостере-
 жуваних та очікуваних значень початкових фаз ра-
 діоімпульсів пачки, з урахуванням (12), вираз (11)
 приймає вид

$$\begin{aligned} \rho^2(\Omega) &= 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (\Phi_i - \Phi_j - \varphi_i + \varphi_j)^2 - \\ &\quad - \frac{1}{2} T^2 \Omega^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i - j)^2 - \\ &\quad - T \Omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i - j) (\Phi_i - \varphi_i - \Phi_j + \varphi_j). \end{aligned} \quad (13)$$

При симетричному розподілі амплітуд радіоім-
 пульсів пачки $\xi_i = \xi_{n+1-i}$, справедливими є наступні
 рівності:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (\Phi_i - \Phi_j - \varphi_i + \varphi_j)^2 &= \sum_{k=1}^m \xi_k (\Delta\Phi_k + \Delta\varphi_k)^2 + \\ &+ 2 \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \xi_k \xi_l (S_k - S_l + S_{\varphi k} - S_{\varphi l})^2; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i - j)^2 = \sum_{k=1}^m \xi_k (2k - 1)^2; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i - j) (\Phi_i - \varphi_i - \Phi_j + \varphi_j) &= \\ &= \sum_{k=1}^m \xi_k (2k - 1) (\Delta\Phi_k + \Delta\varphi_k), \end{aligned} \quad (16)$$

де $\Delta\Phi_k = \Phi_{m+1-k} - \Phi_{m+k}$; $S_k = \Phi_{m+1-k} + \Phi_{m+k}$ – різни-
 ця і сума фаз симетричних радіоімпульсів пачки;
 $\Delta\varphi_k = \varphi_{m+1-k} - \varphi_{m+k}$; $S_{\varphi k} = \varphi_{m+1-k} + \varphi_{m+k}$ – різниця і
 сума флукуаційних складових фаз симетричних
 радіоімпульсів пачки; k і l – номери пар радіоім-
 пульсів, симетричних відносно центру пачки; m -
 число пар радіоімпульсів, симетричних відносно
 центру пачки.

З урахуванням виразів (14–16), вираз (13) мож-
 на перетворити до виду

$$\begin{aligned} \rho^2(\Omega) &= 1 - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \xi_k [\Delta\Phi_k + \Delta\varphi_k - (2k - 1)\Omega T]^2 - \\ &\quad - \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \xi_k \xi_l (S_{\varphi k} - S_{\varphi l})^2. \end{aligned} \quad (17)$$

У виразі (17) останній доданок не залежить від
 вимірюваного параметра, тому у подальшому роз-
 гляді його можна не враховувати.

Таким чином, інформація про частоту пачки міс-
 титься в різниці фаз її симетричних радіоімпульсів.

Наявність у виразі (17) випадкових складових різниць фаз симетричних радіоімпульсів пачки свідчить про необхідність переходу до усередненого відношення правдоподібності виду

$$\bar{\ell}(\Omega) = \int_{(\Delta\bar{\varphi})} \ell(\Omega / \Delta\bar{\varphi}) p(\Delta\bar{\varphi}) d\Delta\bar{\varphi}, \quad (18)$$

де $\bar{\varphi} = \|\Delta\varphi_k\|$ – вектор-стовпець значень випадкових складових різниць фаз симетричних радіоімпульсів пачки; $p(\Delta\bar{\varphi})$ – закон розподілу їх щільності імовірності; $d\Delta\bar{\varphi} = d\Delta\varphi_1 d\Delta\varphi_2 \dots d\Delta\varphi_m$.

Вважається, що фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом с нульовим середнім, а кореляційна матриця фазових флуктуацій має наступний вид

$$K_\varphi = \|\sigma_\varphi^2 a^{|i-j|}\| \quad i, j \in 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

де σ_φ^2 – дисперсія фазових флуктуацій; a – коефіцієнт кореляції фазових флуктуацій сусідніх радіоімпульсів пачки; i та j – номери радіоімпульсів пачки.

Таким чином, при $a > 0$ зі збільшенням інтервалу між радіоімпульсами пачки кореляція убуває за експоненціальним (рис. 1, а), а при $a < 0$ – за знакозмінним законом (рис. 1, б).

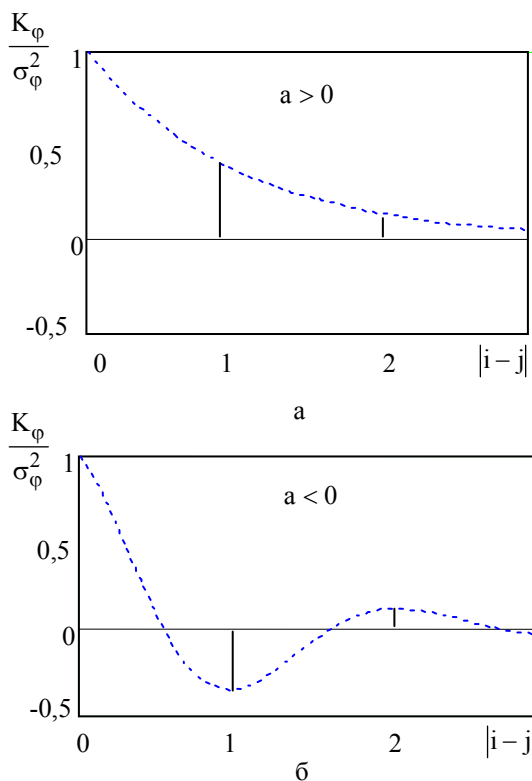


Рис. 1. Закони зміни кореляції фазових флуктуацій

Коефіцієнти кореляції фазових флуктуацій радіоімпульсів пачки, рознесених на період слідування T , можуть бути описані експоненціальною, гаусо-

вою та осцилюючою залежностями, які визначаються відповідними виразами виду:

$$a = e^{-\frac{T}{\tau}}; \quad (20)$$

$$a = e^{-\left(\frac{T}{\tau}\right)^2}; \quad (21)$$

$$a = e^{-\frac{T}{\tau}} \cos(\gamma T), \quad (22)$$

де τ – інтервал кореляції флуктуацій фази радіосигналу; $\gamma = 2\pi/T_{\text{осц}}$ – частота осцилюючого коефіцієнта кореляції фази; $T_{\text{осц}}$ – період осцилюючого коефіцієнта кореляції фази.

На рис. 2 зображені графіки коефіцієнтів кореляції: експоненціальної (крива 1), гаусової (крива 2), осцилюючої (крива 3) форми від відношення T/τ .

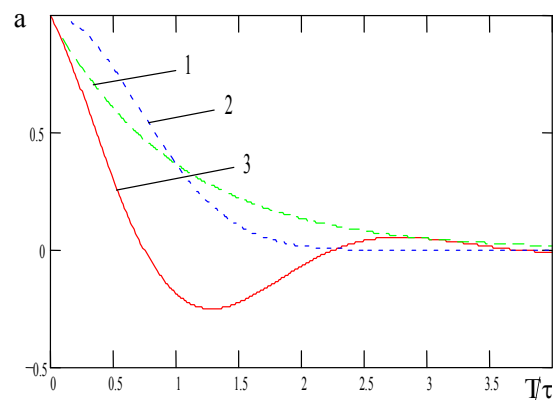


Рис. 2. Коефіцієнти кореляції фазових флуктуацій

Далі необхідно отримати щільність імовірності випадкових складових різниць фаз симетричних радіоімпульсів пачки.

Щільність ймовірності фазових флуктуацій описується виразом виду [14]

$$p(\bar{\varphi}) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |K_\varphi|^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \bar{\varphi}^T K_\varphi^{-1} \bar{\varphi}\right), \quad (23)$$

де $\bar{\varphi} = \|\varphi_i\|$, ($i = 1, 2, \dots, n$) – вектор-стовпець значень випадкових складових фаз радіоімпульсів пачки.

Вираз щільності ймовірності різниць фаз $P(\Delta\bar{\varphi})$ має вид:

$$P(\Delta\bar{\varphi}) = (2\pi)^{-m} |K_{\Delta\varphi}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \Delta\bar{\varphi}^T K_{\Delta\varphi}^{-1} \Delta\bar{\varphi}\right). \quad (24)$$

Кореляційна матриця $K_{\Delta\varphi}$ різниці флуктуаційних складових фаз радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки, може бути отримана згідно виразу

$$K_{\Delta\varphi} = \langle \Delta\bar{\varphi} \Delta\bar{\varphi}^T \rangle = A \langle \bar{\varphi} \bar{\varphi}^T \rangle A^T = A K_\varphi A^T, \quad (25)$$

де $\langle \rangle$ – операція статистичного усереднення; A – матриця перерахунку вектора фазових флуктуацій $\bar{\varphi} = \|\varphi_i\|$, ($i = 1, 2, \dots, n$) в вектор флуктуацій різниць

фаз $\Delta\bar{\varphi} = \|\Delta\varphi_k\|$, ($k=1,2\dots m$) симетричних радіоімпульсів пачки ($\Delta\bar{\varphi} = A\bar{\varphi}$).

Для пачки з чотирьох радіоімпульсів вираз щільності ймовірності $P(\Delta\bar{\varphi})$ може бути отримано наступним чином.

Матриця перерахунку має вид

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Кореляційна матриця фазових флуктуацій (19) може бути записана наступним чином

$$K_{\Delta\varphi} = \sigma_{\varphi}^2 \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 & a^3 \\ a & 1 & a & a^2 \\ a^2 & a & 1 & a \\ a^3 & a^2 & a & 1 \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Кореляційна матриця $K_{\Delta\varphi}$ з врахуванням (25-27) приймає вид:

$$K_{\Delta\varphi} = 2\sigma_{\varphi}^2 \begin{pmatrix} 1-a & a(1-a) \\ a(1-a) & 1-a^3 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Визначник матриці дорівнює

$$|K_{\Delta\varphi}| = 4\sigma_{\varphi}^4(1-a)(1-a^2). \quad (29)$$

З використанням співвідношень (28) і (29), обернена кореляційна матриця має вид:

$$K_{\Delta\varphi}^{-1} = \frac{1}{2\sigma_{\varphi}^2(1-a^2)} \begin{pmatrix} (1+a+a^2) & -a \\ -a & 1 \end{pmatrix}. \quad (30)$$

З урахуванням наведених виразів, співвідношення (24) перетворюється до виду

$$p(\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2) = \frac{1}{(2\sqrt{2}\pi\sigma_{\varphi})^2 \sqrt{(1-a)(1-a^2)}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{\varphi}^2(1-a^2)} \times [(1+a+a^2)\Delta\varphi_1^2 - 2a\Delta\varphi_1\Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_2^2]\right\}. \quad (31)$$

Шляхом проведення даних операцій для пачок з різною кількістю радіоімпульсів можна показати, що у випадку довільної кількості радіоімпульсів у пачці, щільність ймовірності $P(\Delta\bar{\varphi})$ при $m \geq 2$ визначається виразом

$$p(\Delta\bar{\varphi}) = \frac{\sqrt{1+a}}{(2\sqrt{2}\pi\sigma_{\varphi})^m (1-a^2)^{m/2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{4\sigma_{\varphi}^2(1-a^2)} [\Delta\varphi_m^2 + (1+a+a^2)\Delta\varphi_1^2 + (1+a^2)\sum_{k=2}^{m-1} \Delta\varphi_k^2 - 2a\sum_{k=1}^{m-1} \Delta\varphi_k \Delta\varphi_{k+1}]\right\}. \quad (32)$$

Усереднене відношення правдоподібності (18) для частоти сигналу з урахуванням виразу (32) приймає вид

$$\bar{l}(\Omega) = K \int_{(\Delta\bar{\varphi})} \exp\left[-\frac{q^2}{2}(a_{1,1}\Delta\varphi_1^2 + a_{m,m}\Delta\varphi_m^2 + \sum_{k=2}^{m-1} a_{k,k}\Delta\varphi_k^2 + 2\sum_{k=1}^{m-1} a_{k,k+1}\Delta\varphi_k\Delta\varphi_{k+1} + 2\sum_{k=1}^m a_{k,m+1}\Delta\varphi_k)\right] d\Delta\varphi_1 d\Delta\varphi_2 \dots d\Delta\varphi_m, \quad (33)$$

де

$$K = \frac{2\sqrt{1+a}}{q^2(2\sqrt{2}\pi\sigma_{\varphi})^m (1-a^2)^{m/2}} \times \exp\left[\frac{q^2}{2}\left(1 - \frac{1}{2}\sum_{k=1}^m \xi_k \delta\Phi_k^2\right)\right]; \quad a_{1,1} = \frac{1+a+a^2}{2\gamma(1+a)} + \frac{\xi_1}{2};$$

$$a_{m,m} = \frac{1}{2\gamma(1+a)} + \frac{\xi_m}{2}; \quad a_{k,k} = \frac{1+a^2}{2\gamma(1+a)} + \frac{\xi_k}{2}$$

$$(k=2,3,\dots,m-1); \quad a_{k,k+1} = a_{k+1,k} = -\frac{a}{2\gamma(1+a)};$$

$$a_{k,m+1} = a_{m+1,k} = \frac{1}{2}\xi_k \delta\Phi_k; \quad \gamma = q^2\sigma_{\varphi}^2(1-a);$$

$$\delta\Phi_k = \Delta\Phi_k - (2k-1)\Omega T.$$

Параметр γ забезпечує врахування впливу внутрішніх шумів та корельованих фазових флуктуацій.

Отримання усередненого відношення правдоподібності $\bar{l}(\Omega)$ дозволяє оцінити параметр Ω та за допомогою виразу (1) визначити радіальну швидкість цілі.

Таким чином, використання наведеної методики оцінювання дозволяє провести оптимізацію часочастотної обробки радіолокаційного сигналу в когерентно-імпульсних РЛС з метою покращення показників якості радіолокаційного спостереження.

Висновки

В сучасних РЛС в якості зондувального сигналу широко використовується когерентна пачка радіоімпульсів. Реальні умови виконання РЛС завдань за призначенням обумовлюють виникнення корельованих флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки.

Оптимальне вимірювання радіальної швидкості цілі пов'язано із оцінюванням різниць фаз симетричних радіоімпульсів пачки. Врахування флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки при вимірюванні радіальної швидкості цілі дозволить підвищити якість радіолокаційного спостереження складних, малопомітних та маневруючих цілей.

Список літератури

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

2. Троян А. Основные итоги военной кампании Запада в Ливии / А. Троян // Зарубежное военное обозрение. – 2012. – № 4. – С. 8-15.
3. Вильданов М.В. Совершенствование планирования боевого применения стратегических сил США / М.В. Вильданов // Зарубежное военное обозрение. – 2006. – № 7. – С. 9-12.
4. Оценка возможностей обнаружения целей при наличии морского тропосферного волновода / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, А.В. Челпанов, К.П. Квиткин // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 6 (87). – С. 91-94.
5. Деякі аспекти локації маловисотних цілей за межами дальності прямої видимості над морем / В.Д. Карлов, С.О. Меленті, О.К. Шейгас, М.М. Петрушенко // Системи обробки інформації. – 2013. – Вип. 1 (108). – С. 66-69.
6. Карлов В.Д. Свойства морского тропосферного волновода как элемента радиоканала / В.Д. Карлов, В.Л. Мисайлов, Н.Н. Петрушенко // Системи обробки інформації. – 2008. – Вип. 6 (73). – С. 54-58.
7. К вопросу о измерении доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем / В.Д. Карлов, А.К. Кондратенко, А.К. Шейгас, Ю.Б. Ситник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – Вип. 1 (14). – С. 115-117.
8. Карлов В.Д. Деякі результати підвищення точності виміру швидкості локації цілей в умовах турбулентної нестабільності середовища розповсюдження радіохвиль / В.Д. Карлов, Д.В. Карлов, М.М. Петрушенко // Тези доповідей 10 науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» – Ф.: 2–3 вересня, 2010. – С. 289.
9. К вопросу об измерении радиальной составляющей скорости аэродинамической цели при ее локации над морем / В.Д. Карлов, Г.В. Певцов, И.А. Нос, М.М. Петрушенко // Тези доповідей 11 науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» – Ф.: 8–9 вересня, 2011. – С. 108.
10. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: МАКВИС, 1999. – 828 с.
11. Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
12. Петрушенко М.М. Особливості застосування радіотехнічних систем Повітряних Сил в нестабільних гідрометорологічних умовах та стихійних метеорологічних явищах / М.М. Петрушенко // Системи управління навігації та зв'язку. – К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління. – 2009. – № 2 (10). – С. 54-57.
13. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1976. – Т. 1. – 456 с.
14. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

References

1. Alimpiev, A.M., Pevtsov, G.V. and Grib, D.A. (2015), “*Dovidnik uchasnika ATO: ozbroennya i viyskova tekhnika Zbroynikh Sil Rosiyskoi Federatsii*” [Reference book of participant ATO: armament and military technique of Military Powers of Russian Federation], Kharkiv, Original, 732 p.
2. Troyan, A. (2012), “Osnoynnye itogi voyennoy kampanii zapada v Livii” [The main results of the Western military campaign in Libya], *Foreign military review*, No. 4, pp. 8-15.
3. Vildanov, M.V. (2006), “Sovershenstvovaniye planirovaniya boyevogo primeneniya strategicheskikh sil SShA” [Improving the planning of combat employment of US strategic forces], *Foreign military review*, No. 7, pp. 9-12.
4. Karlov, V.D., Petrushenko, N.N., Chelpanov, A.V. and Kvitkin, K.P. (2010), “Otsenka vozmozhnostey obnaruzheniya tseley pri nalichii morskogo troposfernogo volovoda” [Estimation of the possibility of target detection in the presence of a marine tropospheric waveguide], *Information Processing Systems*, Vol. 6 (87), pp. 91-94.
5. Karlov, V.D., Melenti, E.O., Sheygas, O.K. and Petrushenko N.N. (2013), “Deyaki aspekti lokatsii malovisotnykh tsiley za mezhami dalnosti pryamoї vidimosti nad morem” [Some aspects of the location of low-level targets outside the range of direct visibility over the sea], *Information Processing Systems*, Vol. 1 (108), pp. 66-69.
6. Karlov, V.D., Misaylov, V.L. and Petrushenko, N.N. (2008), “Svoystva morskogo troposfernogo volnovoda kak elementa radiokanala” [Properties of the marine tropospheric waveguide as an element of a radio channel], *Information Processing Systems*, Vol. 6 (73), pp. 54-58.
7. Karlov, V.D., Kondratenko, A.K., Sheygas, A.K. and Sitnik, Yu.B. (2014) “K voprosu o izmerenii doplerovskoy chastyoty signala otrazhennogo ot tseli lotsiryue-moy za predelami radiogorizonta nad morem” [To the question of measuring the Doppler frequency of a signal reflected from a target being radiated outside the radio horizon above the sea], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, Vol. 1 (14), pp. 115-117.
8. Karlov, V.D., Karlov, D.V. and Petrushenko, M.M. (2010), “Deyaki rezultati pidvishchennya tochnosti vimiru shvidkosti lokatsii tsiley v umovakh turbulentnoї nestabilnosti seredovishcha rozpovsyudzhennya radiokhvil” [Some results of increasing the accuracy of measuring the rate of location of targets in conditions of turbulent instability of the medium of radio waves propagation], *10 Scientific and technical conference: Creation and modernization of armament and military equipment in modern conditions*, September 2–3, 2010, Feodosia, p. 289.
9. Pievtsov, G.V., Karlov, V.D., Nos, I.A. and Petrushenko, M.M. (2011), “K voprosu ob izmerenii radialnoy sostavlyayushchey skorosti aerodinamicheskoy tseli pri eye lokatsii nad morem” [On the measurement of the radial velocity component of the aerodynamic target when it is located over the sea], *11 Scientific and Technical Conference: Creation and modernization of armament and military equipment in modern conditions*, September 8–9, Feodosia, p. 108.
10. Shirman, Ya. D. (1999), “Radioelektronnyye sistemy. Osnovy postroyeniya i teoriya” [Radioelectronic systems. Basics of construction and theory], MAKVIS, Moscow, 828 p.
11. Ostrovityanov, R.V. and Basalov, F.A. (1982), “Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhemykh tseley” [The statistical theory of long-range radar], Radio and communication, Moscow, 232 p.
12. Petrushenko, N.N. (2009), “Osoblivosti zastosuvannya radiotekhnichnikh sistem Povitryanikh Sil v nestabilnykh gidrometeorologichnikh umovakh ta stikhiynikh meteorologichnikh yavishchakh” [Peculiarities of the application of radio systems of the Air Forces in unstable meteorological conditions and natural meteorological phenomena], *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 2 (10), pp. 54-57.
13. Skolnik, M. (1976), “*Spravochnik po radiolokatsii*” [Reference book on a radar-location], Sov. Radio, Moscow, T. 1, 456 p.
14. Shirman, Ya.D. and Manzhos, V.N. (1981), “*Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh*” [The theory and technology of processing of radar information against the background of hindrances], Radio and communication, Moscow, 416p.

Відомості про авторів:

Карлов Володимир Дмитрович
доктор технічних наук професор
завідувач кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1043-684X>

Кузнєцов Олександр Леонідович
кандидат технічних наук доцент
доцент
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5915-8107>

Артеменко Артур Миколайович
кандидат технічних наук
начальник
Головного управління Генерального штабу
Збройних Сил України,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7716-0406>

Information about the authors:

Vladimir Karlov
Doctor of Technical Sciences Professor
Head of Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1043-684X>

Alexander Kuznietsov
Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5915-8107>

Artur Artemenko
Candidate of Technical Sciences
Head
of Main Department of General Staff
of Armed Forces of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7716-0406>

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЦЕЛИ ПРИ УЧЕТЕ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ НАЧАЛЬНЫХ ФАЗ РАДИОИМПУЛЬСОВ ПРИНЯТОЙ ПАЧКИ

В.Д. Карлов, А.Л. Кузнєцов, А.Н. Артеменко

В статье с общих позиций теории радиолокации рассмотрены методологические основы оценивания радиальной скорости при использовании когерентной пачки радиоимпульсов применительно к случаю наличия в отраженных от цели радиоимпульсах коррелированных флуктуаций начальных фаз. Рассмотрение проводится в предположении, что на вход приемного устройства РЛС поступает аддитивная смесь отраженных от целей сигналов и некоррелированного гауссовского шума. Оценивание доплеровского смещения частоты отраженного от цели сигнала осуществляется по критерию максимума натурального логарифма отношения правдоподобия усредненного по всем возможным значениям случайных неинформативных параметров. Предполагается, что фазовые флуктуации радиоимпульсов принятой пачки распределены по нормальному закону с нулевым средним, а корреляция фазовых флуктуаций с увеличением интервала между радиоимпульсами пачки убывает по экспоненциальному или знакопеременному законам. Получено распределение плотности вероятности случайных составляющих разностей фаз симметричных радиоимпульсов пачки. Показано, что оптимальное оценивание радиальной скорости цели связано с оцениванием данных разностей фаз. Учет флуктуаций начальных фаз радиоимпульсов принятой пачки при измерении радиальной скорости цели позволит улучшить показатели качества радиолокационного наблюдения сложных, малоразмерных и маневрирующих целей, а также обеспечит возможность проведения оптимизации время-частотной обработки радиолокационного сигнала в когерентно-импульсных РЛС.

Ключевые слова: когерентная пачка радиоимпульсов, радиальная скорость, коррелированные флуктуации, начальная фаза, гауссовский шум, отношение правдоподобия, оптимальное измерение, радиолокационное наблюдение.

STATEMENT OF PROBLEM OF TARGET'S RADIAL VELOCITY OPTIMAL ESTIMATION USING INITIAL PHASES CORRELATING FLUCTUATIONS OF RECEIVED RADIO PULSES BURSTS

V. Karlov, O. Kuznietsov, A. Artemenko

The methodological foundations for estimating the target's radial velocity using coherent bursts of radio pulses in accordance with the case of investigating the correlation functions of the initial phases of radio pulses, reflected from targets, have been considered in the article on the basis of the radar theory. The signals at the input of the radar's receiver is an additive mixture of signals reflected from the targets, and uncorrelated Gaussian noise, that is the assumption of investigating. The Doppler shifts of the signals' frequency reflected from the targets are carried out by the criterion of the natural logarithm maximum for likelihood ratio of the random non-informative parameters averaged over all possible values have been estimated. It is assumed, that the phase fluctuations of the received radio pulses bursts are distributed according to normal probability laws with zero mean, and correlations of phase fluctuations decrease with exponential or alternating, sign-variable laws by increasing interval between radio pulses within the bursts.

The probability density distributions of the random components of the phase difference of the symmetrical radio pulses of the burst are obtained. Optimal estimations of the targets' radial velocities are associated with the estimation of the data on the phase differences of the signals have been shown.

Taking into account the fluctuations of the initial phases of the radio pulses of the received bursts during the measurement of the targets' radial velocity makes it possible to improve characteristics of efficiency for surveillance radar operating with complex, less visible and maneuvering targets. It is also provided the possibility of optimizing the time-frequency processing of radar signals in coherent pulse radars.

Keywords: coherent burst of radio pulses, radial velocity, correlated fluctuations, initial phase, Gaussian noise, likelihood ratio, optimal measurement, radar surveillance.