

УДК 681.396.96:681.32

В.Д. Карлов, А.В.Челпанов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АЛГОРИТМ ОБРОБКИ КУТОМІСЦЕВОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ФАЗОВІЙ МОНОІМПУЛЬСНІЙ РЛС

Розглядається алгоритм вторинної обробки кутомісцевої інформації в фазовій моноімпульсній РЛС. Аналізується можливість підвищення точності та усунення неоднозначності оцінки параметрів кутомісцевої траєкторії при використанні когерентної обробки та функціональної залежності між параметрами траєкторії балістичної цілі. Кореляційна обробка когерентної послідовності луна-сигналів цілі дозволяє отримати достатньо точні оцінки кутомісцевої координати та похідних дальності.

Ключові слова: *кутомісцева фаза, моноімпульсна РЛС, траєкторія балістичної цілі*

Вступ

Постановка проблеми. В РЛС з електронним управлінням діаграмою спрямованості при виміря-

ні кутових координат, зокрема, кута місця цілі, досить часто використовується фазовий метод. Він дозволяє забезпечити високу точність одиничних

вимірів кутомісцевої фази. Водночас має місце неоднозначність фазових вимірів, зокрема, на краях сектору огляду, що потребує корекції та усунення неоднозначності при оцінюванні параметрів кутомісцевої траєкторії в ході вторинної обробки.

Аналіз літератури. Основні методи моноімпульсної радіолокації, принципи побудови фазових радіотехнічних систем, їх переваги та недоліки розглянуті в [1 – 3]. Можливості когерентної обробки послідовності радіоімпульсів для оцінки параметрів руху цілі (координат та їх похідних) наведені в [3, 4]. Питання вторинної обробки радіолокаційної інформації, взаємозв'язок між параметрами траєкторії балістичної цілі та можливості її використання для уточнення окремих параметрів руху та усунення неоднозначності вимірів розглянуті в [5, 6].

Метою статті є розробка алгоритму побудови кутомісцевої траєкторії балістичної цілі за результатами одиничних вимірів кутомісцевої фази в моноімпульсній РЛС з усуненням неоднозначності фазових вимірів.

Основна частина

Одною з основних вимог, що пред'являються до РЛС, є точність побудови параметрів траєкторії цілі. Як правило, вимірювання здійснюється в сферичній системі координат (R, β, γ) в ході первинної обробки інформації, з використанням різних методів. Далі отримані виміри (опорні точки супроводження) фільтруються в ході вторинної обробки.

Коефіцієнти згладжування за координатами R, β, γ є непов'язаними [5]. Отже, з точки зору фільтрації випадкових помилок згладжування радіолокаційних координат балістичної траєкторії можна проводити окремо. В той же час між параметрами балістичної траєкторії існує функціональний зв'язок, який визначається диференціальними рівняннями руху [5].

Наприклад, при малих кутах місця γ для радіального прискорення \ddot{R} правдиве співвідношення [6]:

$$\ddot{R} = R \cdot (\dot{\gamma}^2 + \dot{\beta}^2 \cdot \cos^2 \gamma) - \frac{\mu}{r^3} (R + \rho \cdot \sin \gamma), \quad (1)$$

де R, β, γ – відповідно дальність, азимут та кут місця цілі;

$\dot{\gamma}, \dot{\beta}$ – похідні кутових координат;

r – радіус-вектор цілі;

ρ – радіус Землі; $\rho = 6371$ км;

μ – гравітаційна константа; $\mu = 3,986 \cdot 10^5$ км³/с²;

$$r = \sqrt{\rho^2 + R^2 + 2\rho \cdot R \cdot \sin \gamma}. \quad (2)$$

Аналогічні диференціальні рівняння можуть бути записані для азимутального і кутомісцевого прискорення [5].

Враховуючи цей факт, можна використовувати дані співвідношення (1), (2) для уточнення тих параметрів траєкторії балістичної цілі, опорні точки

яких (координати) вимірюються неточно (або неоднозначно).

В якості прикладу можна навести метод усунення неоднозначності вимірювання дальності до цілі і уточнення кутомісцевої швидкості по вимірюванням радіального прискорення.

Розглянемо далі алгоритм вторинної обробки опорних точок кутомісцевої фази та можливості усунення неоднозначності та корекції кута місця цілі в фазовій моноімпульсній РЛС, з використанням функціонального зв'язку між параметрами балістичної траєкторії.

Для вимірювання кута місця цілі $\xi_{Ц}$ (відносно нормалі до розкриття антени) фазовим моноімпульсним методом використовується двоканальна антенно-фідерна система (АФС), в якій верхня та нижня антени структури рознесені на відстань d . Збільшення d підвищує точність відліку, але, в той же час, зменшує діапазон однозначного вимірювання кутомісцевої фази. В кутомісцевому каналі проводиться вимірювання різності фаз сигналів $\Delta\phi$, прийнятих верхньою та нижньою антеною структурами. Значення $\Delta\phi$ визначається положенням цілі відносно нормалі до АФС в кутомісцевій площині $\xi_{Ц}$:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \xi_{Ц}. \quad (3)$$

Звідси отримаємо значення кута місця цілі в і-тому циклі супроводження:

$$\xi_i = \arcsin \frac{\lambda \cdot \Delta\phi_i}{2\pi d}. \quad (4)$$

Використовуючи формули перерахунку в сферичну систему координат (R, β, γ) , отримаємо:

$$\gamma_i = \gamma_0 + \arcsin \frac{\sin \xi_i}{\cos \beta_i}, \quad (5)$$

де γ_0 – константа, що визначається кутом нахилу розкриття АФС; β_i – азимутальне положення цілі.

Сектор огляду по куту місця $\Delta\xi$ повинен відповідати діапазону однозначного вимірювання $\Delta\phi = 2\pi$. Наприклад, для $\lambda = 2$ м, $d = 6$ м отримаємо діапазон однозначного вимірювання кута місця цілі, що дорівнює:

$$\Delta\xi_0 = \arcsin \frac{\lambda \cdot 2\pi}{2\pi d} \approx 20^\circ. \quad (6)$$

При куті нахилу розкриття АФС в 20° сектор, в межах якого кут місця цілі вимірюється однозначно, буде дорівнювати (в сферичній системі координат):

$$\Delta\gamma_0 = \gamma_{\max} - \gamma_{\min}, \quad (7)$$

де $\gamma_{\min} = 10^\circ$; $\gamma_{\max} = 30^\circ$.

Сектор огляду (за рівнем половинної потужності зондуючого сигналу) $\Delta\gamma_{\text{ОГЛ}}$ повинен перекривати даний діапазон кутів з визначеним запасом (наприклад, $\pm 5^\circ$), тобто складатиме величину $\Delta\gamma_{\text{ОГЛ}} = 30^\circ$, від $\gamma = 5^\circ$ до $\gamma = 35^\circ$.

Внаслідок цього, а також за рахунок помилок вимірювання фази, на краях сектору огляду має місце неоднозначність відліку кута місця цілі (помилка у вимірюванні $\Delta\phi$ при цьому складає величину 2π , а у вимірюванні кута місця цілі – 20°).

У зв'язку з цим вторинна обробка інформації – фільтрація опорних точок кутомісцевої фази $\Delta\phi_i$ з використанням звичайного фільтру Калмана буде неефективною. В даному випадку доцільно використовувати кореляційний метод обробки послідовності опорних точок $\Delta\phi_i$. Функцію кутомісцевої фази ϕ_i можна з достатнім ступенем точності представити у вигляді лінійного поліному:

$$\phi_i = \phi_0 + \dot{\phi}(t_i - t_0), \quad (8)$$

де ϕ_0 , $\dot{\phi}$ – параметри поліному (значення фази та її похідної); t_0 – час прив'язки траєкторії кутомісцевої фази; t_i – час відліку параметра i -тої опорної точки; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; n – кількість опорних точок (циклів супроводження).

Як правило, $t_0 = \frac{1}{2}(t_n + t_1)$, що відповідає середині інтервалу супроводження цілі.

Кореляційний метод обробки передбачає порівняння отриманої функції фази ϕ_i з набором з M опорних (еталонних) функцій фази ϕ_{OPji} :

$$\phi_{OPji} = \dot{\phi}_j(t_i - t_0), \quad (9)$$

де $\dot{\phi}_j$ – параметр (кут нахилу) j -тої опорної функції; $j = 1, 2, \dots, M$.

Порівняння здійснюється шляхом обчислення M значень кореляційного інтегралу ψ_j .

$$\psi_i = \frac{1}{n} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n \sin(\phi_i - \phi_{OPji}) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n \cos(\phi_i - \phi_{OPji}) \right]^2}. \quad (10)$$

За оцінку похідної $\hat{\phi}$ (кута нахилу фазової характеристики) приймається значення параметру тієї (k -тої) опорної функції фази, при порівнянні з якою отримане максимальне значення кореляційного інтегралу:

$$\Psi_K = \max_j \{ \psi_j \}.$$

Діапазон змінення величини $\hat{\phi}$ визначається набігом кутомісцевої фази, що дорівнює $\pm 2\pi$ (у залежності від напрямку входу в зону огляду) за час супроводження цілі τ_C :

$$\Delta\hat{\phi} = \left\{ -\frac{2\pi}{\tau_C} \dots \frac{2\pi}{\tau_C} \right\}, \quad \text{де } \tau_C = t_n - t_1.$$

Дискретність відліку $\delta\hat{\phi}$ також визначається часом супроводження (об'ємом інформації або кількістю опорних точок n):

$$\delta\hat{\phi} = \Delta\hat{\phi} / M; \quad M = 2n; \quad n = \tau_C / T_C,$$

де M – кількість опорних функцій фази; T_C – період надходження опорних точок.

Значення ϕ_0 , тобто параметра функції фази в (8), можна оцінити як постійну складову функції фази:

$$\hat{\phi}_0 = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{i=1}^n \sin[\phi_i - \dot{\phi}_K(t_i - t_0)]}{\sum_{i=1}^n \cos[\phi_i - \dot{\phi}_K(t_i - t_0)]}, \quad (11)$$

де $\phi_{Ki} = \dot{\phi}_K(t_i - t_0)$;

$\dot{\phi}_{Ki}$ – опорна функція фази, при порівнянні з якою отримане максимальне значення кореляційного інтегралу.

Далі отримане значення параметрів опорних точок кутомісцевої фази $\Delta\phi_i$ корегуються (усуваються можливі скачки фази на 2π) на основі отриманої функції фази $\phi_i = \hat{\phi}_0 + \hat{\phi}(t_i - t_0)$:

$$\Delta\phi_i^* = \Delta\phi_i + m_i \cdot 2\pi,$$

де: $m_i = E\left[\frac{\phi_i}{2\pi} + \frac{1}{2}\right]$; $E[\dots]$ – ціла частина числа.

Отримані значення кутомісцевої фази $\Delta\phi_i^*$ перераховуються з урахуванням юстировочних коефіцієнтів (4), (5) в значення вимірів кута місця γ_i . Далі здійснюється їх фільтрація та визначення параметрів траєкторії кута місця цілі:

$$\gamma_1(t) = \gamma_1 + \dot{\gamma}_1(t - t_0). \quad (12)$$

У залежності від значень кута входу (початку) γ_H та виходу (кінця) γ_K отриманої траєкторії (12) формується ще одна послідовність опорних точок кутомісцевої фази, що відрізняється на значення $\pm 2\pi$ (зважаючи на можливу неоднозначність відліку у верхній чи нижній частині сектору огляду по куту місця):

$$\Delta\phi_{gi}^* = \Delta\phi_i^* + \Delta, \quad (13)$$

де $\Delta = 2\pi$, якщо

$$[(\gamma_H < \gamma_{\min} + \delta) \vee (\gamma_K < \gamma_{\min} + \delta)] \wedge (\gamma_1 < \gamma_0);$$

$$\Delta = -2\pi, \text{ якщо}$$

$$[(\gamma_H > \gamma_{\max} - \delta) \vee (\gamma_K > \gamma_{\max} - \delta)] \wedge (\gamma_1 > \gamma_0);$$

$$\gamma_H = \gamma_1 + \dot{\gamma}_1(t_1 - t_0); \quad \gamma_K = \gamma_1 + \dot{\gamma}_1(t_n - t_0);$$

$$\delta = \frac{1}{2}(\Delta\gamma_{OGL} - \Delta\gamma_O).$$

Далі здійснюється фільтрація отриманих опорних точок кутомісцевої фази $\Delta\phi_{gi}^*$ з перерахунком у параметри кутомісцевої траєкторії:

$$\gamma_2(t) = \gamma_2 + \dot{\gamma}_2(t - t_0) \quad (14)$$

В результаті отримаємо дві можливі траєкторії (12), (14) по куту місця $\gamma_1(t)$ та $\gamma_2(t)$ (у верхній та нижній частині сектору огляду).

Остаточний вибір найбільш достовірної траєкторії здійснюється на основі уточнених оцінок радіального прискорення цілі \hat{R} , з використанням функціонального зв'язку, що визначається диференціальними рівняннями руху для балістичної цілі (1).

Для цього у виразі (1) підставляються почерго-во значення γ_1 та γ_2 з (12) та (14). Отримані значення \ddot{R}_1 та \ddot{R}_2 порівнюються з величиною оцінки \hat{R} та те, яке більшою мірою відповідає даній точній оцінці, вважається отриманим по більш достовірному параметру кутомісцевої траєкторії (γ_1 чи γ_2).

Достатньо точну оцінку радіального прискорення \hat{R} можна отримати в процесі фільтрації опорних точок за дальністю та використовуючи режим когерентної обробки послідовності імпульсів за m тактів роботи РЛС. В ході когерентної обробки здійснюється відлік значень фази луна-сигналів відносно фази зондуючого сигналу:

$$\Phi_i = \Phi_{ЛС} - \Phi_{ЗС}.$$

Закон зміни функції фази Φ_i визначається параметрами траєкторії цілі по дальності (R_0, \dot{R}, \ddot{R}):

$$\begin{aligned} \Phi_i &= 2\pi f t_{z_i} = 2\pi f \frac{2R_i}{c} = \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + \dot{R}(t_i - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{R}(t_i - t_0)^2], \end{aligned} \quad (15)$$

де t_{z_i} – часова затримка луна-сигналу відносно зондуючого в i -тому такті роботи РЛС; $i=1, 2, \dots, m$.

Отримана функція фази є квадратичною, її складові $\Phi_0, \dot{\Phi}$ та $\ddot{\Phi}$ визначаються відповідно дальністю R_0 , радіальною швидкістю \dot{R} та радіальним прискоренням \ddot{R} цілі:

$$\Phi_i = \Phi_0 + \dot{\Phi}(t_i - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{\Phi}(t_i - t_0)^2. \quad (16)$$

Обробка отриманої функції фази здійснюється кореляційним методом, шляхом порівняння з набором з S еталонних (опорних) функцій фази:

$$\Phi_{ОПij} = \dot{\Phi}_j(t_i - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{\Phi}_j(t_i - t_0)^2, \quad (17)$$

де значення параметрів опорних функцій $\dot{\Phi}_j$ та $\ddot{\Phi}_j$ відповідають конкретним значенням радіальної швидкості \dot{R}_j та \ddot{R}_j .

При цьому проводиться обчислення S значень кореляційного інтегралу Q_j :

$$Q_j = \frac{1}{m} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^m \sin(\Phi_i - \Phi_{ОПij}) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^m \cos(\Phi_i - \Phi_{ОПij}) \right]^2}$$

Значення параметрів тієї (k -тої) опорної функції фази, при порівнянні з якою отримане максимальне значення кореляційного інтегралу Q_{\max} , приймаються за оцінки значень радіальної швидкості та прискорення: $\hat{R} = \dot{R}_K$; $\hat{R} = \ddot{R}_K$. Точність оцінок \hat{R} , що отримуються дозволяє використовувати їх для усунення неоднозначності при вимірюванні кута місця цілі.

Висновки

Таким чином, кореляційна обробка когерентної послідовності луна-сигналів цілі дозволяє отримати достатньо точні оцінки кутомісцевої координати та похідних дальності. Усунення неоднозначності вимірів кута місця балістичної цілі можна забезпечити за рахунок використання функціональних зв'язків між параметрами її траєкторії.

Список літератури

1. *Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация.* – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
2. *Пестряков В.Б., Кузнецов В.Д. Радиотехнические системы.* – М.: Радио и связь, 1984. – 420 с.
3. *Радиотехнические системы / Под ред. Ю.М. Казаринова.* – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
4. *Обработка сигналов в многоканальных РЛС./Под ред. А.П. Лукошкина.* – М.: Радио и связь, 1983. – 328 с.
5. *Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации.* – М.: Сов. радио, 1974. – 432 с.
6. *Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации.* – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.

Надійшла до редколегії 3.06.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ КУТОМИСЦЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ФАЗОВОЙ МОНОИМПУЛЬСНОЙ РЛС

В.Д. Карлов, А.В. Челпанов

Рассматривается алгоритм вторичной обработки угломестной информации в фазовой моноимпульсной РЛС. Анализируется возможность повышения точности и устранения неоднозначности оценки параметров угломестной траектории при использовании когерентной обработки и функциональной зависимости между параметрами траектории баллистической цели. Корреляционная обработка когерентной последовательности сигналов эха цели позволяет получить достаточно точные оценки угломестной координаты и производных дальности

Ключевые слова: угломестная фаза в моноимпульсной РЛС, траектория баллистической цели.

ALGORITHM OF TREATMENT KELEVATION BEARING INFORMATION IN PHASE MONOPULSE RLS

V.D. Karlov, A.V. Chelpanov

The algorithm of the second treatment of elevation information is examined in phase monopulse RLS. Possibility of increase of exactness and disambiguating estimation of parameters of elevation trajectory is analysed at the use of coherent treatment and functional dependence between the parameters of trajectory of ballistic purpose. Cross-correlation treatment of coherent sequence of signals of echo of purpose allows to get the exact enough estimations of elevation co-ordinate and derivates of distance.

Keywords: elevation phase is in monopulse P.LC, elevation trajectory, trajectory ballistic aim.