

УДК 621.396.967.15

А.В. Челпанов, Р.Г. Сидоренко

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТРАЄКТОРНИХ ОЦІНОК БАЛІСТИЧНИХ ЦІЛЕЙ

Розглядається можливість визначення достовірності та підвищення точності поточних оцінок параметрів траєкторій балістичних цілей з селекцією грубих помилок обумовлених неоднозначністю вимірювань координат шляхом використання спеціальних методів селекції – найменших квадратів та на основі порядкових критеріїв. Для цього використовуються відомі функціональні залежності між параметрами балістичної траєкторії.

Ключові слова: супроводження цілей, рекурентна обробка, селекція помилок вимірювань.

Вступ

Постановка проблеми. При супроводженні цілі здійснюється формування параметрів позначок (вимірювань координат) та їх рекурентна фільтрація (згладжування) з визначенням поточних оцінок параметрів траєкторії цілі [1].

На точність отриманих оцінок впливають помилки вимірювань – “нормальні”, розподіл яких звичайно відомий і грубі помилки, зокрема, за рахунок неоднозначності вимірювань координат [2 – 4].

Для виявлення і усунення грубих помилок використовуються спеціальні методи селекції – найменших квадратів, на основі порядкових критеріїв тощо [3].

Мета статті – підвищення точності поточних оцінок параметрів траєкторії цілі та виявлення і селекція грубих помилок вимірювань координат, зокрема, обумовлених неоднозначністю вимірів дальності та кута місця цілі, за рахунок використання функціональних залежностей між параметрами балістичної траєкторії.

Основний матеріал

На заключному етапі первинної обробки радіолокаційної інформації (РЛІ) здійснюється формування параметрів позначок (опорних точок) $x(t_i)$ в кожному i -тому циклі супроводження на основі одиничних вимірів координат цілей, де $x = R, \beta, \gamma$ (дальність, азимут, кут місця цілі).

Вимірювання координат здійснюється з помилками, як в межах заданих допусків, так і при наявності грубих помилок, зокрема, за рахунок неоднозначності відліку.

Неоднозначність вимірювання дальності виникає, наприклад, при значній потужності (енергії) і малому періоді повторення зондуєчи сигналів РЛС.

Неоднозначність вимірювання кута місця цілі характерна для фазової моноімпульсної РЛС на краях сектору огляду.

Помилки вимірювань параметрів позначок визначають відповідні помилки поточних оцінок параметрів траєкторії цілі, та значення елементів кореляційної матриці помилок (КМП) ψ_x , які формуються в процесі вторинної рекурентної обробки РЛІ. Зокрема, для поліноміальної моделі траєкторії визначаються оцінки координат x_T та їх похідних \dot{x}_T, \ddot{x}_T :

$$x_T(t) = x_T(t_0) + \dot{x}_T(t - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{x}_T(t - t_0)^2. \quad (1)$$

Оцінка достовірності отриманих оцінок параметрів траєкторії здійснюється шляхом аналізу їх відповідності параметрам позначок, отриманих за час супроводження цілі. Для цього формуються розбіжності (нев'язки):

$$\delta x_i = x_T(t_i) - x(t_i), \quad (2)$$

де $x = R, \beta, \gamma, \dot{R}$.

Із сукупності $i = 1, 2, 3 \dots n$ невязок вибираються максимальні $\delta x_m = \max_i \delta x_i$.

Визначаються середньоквадратичні значення невязок:

$$\sigma(\delta_x) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \kappa_i (\delta x_i)^2}, \quad (3)$$

де $M = \sum_{i=1}^n \kappa_i$; $\kappa_i = \begin{cases} 1 & \text{при } p_i > 0, \\ 0 & \text{при } p_i = 0; \end{cases}$ p_i – вага вимірювань (позначок).

Дисперсія на одиницю ваги визначається як:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n p_i (\delta x_i)^2.$$

Перевірка достовірності поточних оцінок параметрів траєкторії цілі здійснюється порівнянням значень максимальних невязок і середньоквадратичних помилок (СКП) з певними допусками.

Наприклад,

$$\delta x_m \leq \frac{1}{2} \Delta x_c; \quad \sigma(\delta_x) \leq \frac{1}{6} \Delta x_c, \quad (4)$$

де Δx_c – розмір строга супроводження за координатою x .

Якщо нерівності (4) виконуються, приймається рішення про достовірність отриманої інформації.

Значення дисперсії σ_x^2 використовуються для корекції значень елементів КМП ψ_x . Дана корекція ґрунтується на тому, що значення елементів КМП ψ_x обернено пропорційні вагам вимірювань p_i . Для цього розраховується усереднений коефіцієнт

$$L(\sigma) = \frac{1}{4} \left[\sigma_R^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_\gamma^2 + \sigma_{\dot{R}}^2 \right]. \quad (5)$$

Коефіцієнт $L(\sigma)$ дає співвідношення між закладеними вагами вимірювань параметрів x і реальною розбіжністю (дисперсією помилок) вимірювань.

Корекція значень елементів КМП здійснюється шляхом їх множення на значення коефіцієнта $L(\sigma)$:

$$\psi_{xk} = L(\sigma) \psi_x. \quad (6)$$

На виході етапу рекурентної обробки маємо вектор поточних оцінок параметрів траєкторії цілі x_T , кореляційну матрицю помилок ψ_x і сукупність позначок (опорних точок) $x(t_i)$ за час супроводження цілі.

Підвищення точності оцінок параметрів балістичної траєкторії можливо за рахунок додаткової обробки отриманих даних, зокрема:

а) селекції грубих помилок, обумовлених неоднозначністю вимірювань;

б) уточнення похідних координат.

Ці завдання вирішуються шляхом використання функціональних залежностей між параметрами балістичної траєкторії [3]:

$$\ddot{R}_6 = R(\dot{\gamma}^2 + \dot{\beta}^2 \cdot \cos^2 \gamma) - \frac{\mu}{r^3} (R + \rho \sin \gamma), \quad (7)$$

де: R, β, γ – оцінки координат; $\dot{\beta}, \dot{\gamma}$ – оцінки кутових швидкостей; \ddot{R}_6 – значення радіального прискорення для балістичної траєкторії цілі з параметрами $R, \beta, \gamma, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$; μ – гравітаційна стала, $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3 / \text{с}^2$; $\rho = 6371 \text{ км}$ – радіус Землі; $r = (\rho^2 + R^2 + \rho R \sin \gamma)^{1/2}$ – радіус-вектор цілі.

Аналіз проводиться за ступенем збігу значень балістичного прискорення \ddot{R}_6 за даними поточних оцінок параметрів траєкторії (\ddot{R}_{61}), та з урахуванням можливості неоднозначності вимірів за дальністю чи куту місця (\ddot{R}_{62}), у порівнянні з поточними оцінками радіального прискорення \ddot{R}_T . Спочатку визначається неоднозначність за дальністю. Якщо

$$\left| \ddot{R}_T - \ddot{R}_{62} \right| < \left| \ddot{R}_T - \ddot{R}_{61} \right|, \quad (8)$$

то приймається рішення про неоднозначність вимірів дальності, тобто $R_0 = R_T + \Delta R_0$. Тут \ddot{R}_{61} обчи-

слюється для $R = R_T, \dot{\beta}_T, \gamma_T, \dot{\gamma}_T$, а \ddot{R}_{62} – для $R = R_T + \Delta R_0$, де ΔR_0 – інтервал однозначності вимірювання дальності. Відповідно визначається неоднозначність за кутом місця, тобто приймається рішення $\gamma_0 = \gamma_T$ чи $\gamma_0 = \gamma_T \pm \Delta \gamma_0$. При цьому для обчислення \ddot{R}_{61} використовуються значення $R = R_0, \dot{\beta}_T, \gamma_T, \dot{\gamma}_T$; а для \ddot{R}_{62} – значення $\gamma = \gamma_T \pm \Delta \gamma_0$, де $\Delta \gamma_0$ – сектор однозначного вимірювання кута місця.

Достовірність селекції помилок неоднозначності визначається точністю поточних оцінок параметрів траєкторії, зокрема, радіального прискорення \ddot{R}_T . За даними аналізу [3], помилки оцінки $\delta \ddot{R}$, у залежності від типу траєкторії, повинні бути не більш $1 \dots 5 \text{ м/с}^2$. Відповідну точність – середньоквадратичну помилку (СКП) можна отримати при використанні послідовностей із m когерентних зондуючих імпульсів [4]:

$$\sigma_{\ddot{R}} = \frac{1,7 \cdot \lambda}{m^2 T^2}$$

(λ – довжина хвилі; T – період повторення імпульсів).

При $m = 32, \lambda = 2 \text{ м}, T = 4 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ отримуємо СКП прискорення $\sigma_{\ddot{R}} = 2 \text{ м/с}^2$. За отриманими даними уточнюються позначки за дальністю R_1 і кутом місця γ_1 і фільтруються з визначенням оцінок параметрів траєкторії: $R_{T0}(t), \gamma_{T0}(t)$.

Подальше уточнення параметрів траєкторії балістичної цілі проводиться з використанням різних методів, у залежності від об'єму вибірки вимірювань (часу супроводження цілі).

Висновки

При обробці малих інтервалів (до однієї хвилини) уточнюються значення кутових швидкостей $\dot{\beta}, \dot{\gamma}$ з використанням залежностей [2]:

$$\dot{\beta}_y = \dot{\beta}_T \left[1 + 4R_0 \cos^2 \gamma_0 \cdot \sigma^2(\dot{\beta})(\ddot{R}_6 - \ddot{R}_T) \right]^{1/2}$$

$$\dot{\gamma}_y = \dot{\gamma}_T \left[1 + 4R_0 \cdot \sigma(\dot{\gamma})(\ddot{R}_6 - \ddot{R}_T) \right]^{1/2}.$$

При обробці середніх (до двох хвилин) та великих (до п'яти хвилин) інтервалів супроводження доцільно використовувати алгоритми мінімізації функціоналу за методом найменших квадратів (МНК), зокрема, для середніх інтервалів – по складовим швидкості, а для великих – по всім шести параметрам траєкторії. При обробці інтервалів, які перевищують п'ять хвилин (для космічних об'єктів), доцільно використовувати орбітальні параметри з рішенням двохточечної задачі (за даними поточних оцінок параметрів траєкторії для початкової та кінцевої ділянки супроводження [2]).

Список літератури

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВЦ, 2000. – 428 с.
2. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю.С. Саврасов. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.
3. Обработка сигналов в многоканальных РЛС / Под ред. А.П. Лукошкина. – М.: Радио и связь, 1983. – 323 с.

4. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / А. Фарина, Ф. Студер; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 340 с.

Надійшла до редколегії 29.06.2013

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

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНЫХ ОЦЕНОК БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕЙ

А.В. Челпанов, Р.Г. Сидоренко

Рассматривается возможность определения достоверности и повышения точности поточных оценок параметров траекторий баллистических целей с селекцией грубых ошибок, обусловленных неоднозначностью измерений координат путем использования специальных методов селекции – наименьших квадратов и на основе порядковых критериев. Для этого используются известные функциональные зависимости между параметрами баллистической траектории.

Ключевые слова: сопровождение целей, рекуррентная обработка, селекция ошибок измерений.

POSSIBILITIES OF INCREASE OF EXACTNESS OF TRAJECTORY ESTIMATIONS OF BALLISTIC AIMS

A.V. Chelpanov, R.G. Sidorenko

Possibility of determination of authenticity and increase of exactness of поточных estimations of parameters of trajectories of ballistic aims is examined with the selection of flagrant errors, measurings of co-ordinates conditioned an ambiguousness by the use of the special methods of selection – leastsquares and on the basis of index criteria. For this purpose the known functional dependences are utilized between the parameters of ballistic trajectory.

Keywords: accompaniment of aims, recurrent treatment, selection of errors of measurings.