

УДК 621.396.96

А.В. Челпанов, С.О. Карпейчик, О.Ю. Прядко, В.М. Решетнік

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## АДАПТАЦІЯ ПРИСТРОЇВ ТА АЛГОРИТМІВ ВТОРИННОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

При вирішенні завдань вторинної обробки радіолокаційної інформації за даними РЛС вид маневру, який здійснює ціль, як правило, невідомий. Тому важливе практичне значення має синтез адаптивних алгоритмів траєкторної фільтрації. У статті розглядається можливість підвищення ефективності супроводження цілей за рахунок адаптивної корекції значень кореляційної матриці помилок вимірювань, а також оцінок параметрів траєкторії цілі, що маневрує. Запропонована структурна схема пристрою, що реалізує адаптивний алгоритм вторинної обробки радіолокаційної інформації. Алгоритм обробки інформації включає процедуру своєчасного виявлення маневру цілі та оцінювання його інтенсивності.

**Ключові слова:** радіолокаційна інформація, помилки вимірювання, фільтр Калмана, маневр цілі, адаптивний алгоритм, кореляційна матриця

### Постановка проблеми

Сучасні засоби повітряного нападу характеризуються можливостями застосування у широкому діапазоні швидкостей і висот, високими маневреними можливостями. На якість супроводження таких цілей впливають різноманітні фактори, основними з яких є:

точність одиничних вимірювань, що визначається величиною інструментальних, шумових помилок та наявністю випадкових збоїв (аномальних вимірювань) [1];

маневр цілі [2];

невідповідність параметрів фільтра (зокрема, обраної моделі руху цілі) реальній траєкторії цілі [1];

характеристики цілі (зокрема, її структура – одиночна, групова або складна ціль) [2].

В реальних умовах часто має місце апріорна невизначеність при вторинній обробці радіолокаційної інформації, зокрема, при супроводженні складної цілі, статистичні характеристики помилок вимірів можуть змінюватись. Крім того, змінюються коефіцієнти апроксимуючого поліному траєкторії при здійсненні ціллю маневру.

У зв'язку з цим з'являється необхідність алгоритмічної адаптації процесу вторинної обробки радіолокаційної інформації (РЛІ).

**Метою статті** є розгляд можливостей оцінки точносних характеристик вимірювального тракту з селекцією аномальних спостережень, та виявлення маневру цілі з оцінкою характеристик маневру.

Для досягнення заданої мети пропонується використовувати результати аналізу поточних помилок фільтрації, на основі яких проводиться корекція оцінок параметрів траєкторії цілі, що супроводжується, і кореляційної матриці помилок (КМП) вимірювань.

### Основна частина

Спочатку розглянемо можливість оцінки і урахування помилок вимірювання для адаптації процесу калмановської фільтрації.

На ділянці без маневру траєкторія цілі може бути представлена у вигляді поліному 1-ої степені:

$$x_{(i)} = x_0 + \dot{x}(t_i - t_0), \quad (1)$$

де  $x_0, \dot{x}$  – оцінювані параметри траєкторії (координати та швидкості) на момент часу  $t_0$ .

Найбільшу точність оцінок параметрів траєкторії цілі в цьому випадку дає обробка в лінійному фільтрі Калмана 2-го порядку [1]. В цьому фільтрі здійснюються перетворення вигляду:

$$\hat{x}_{(i)} = x_{e(i)} + K_{(i)} [y_{(i)} - Hx_{e(i)}];$$

$$x_{e(i)} = Fx_{e(i-1)};$$

$$K_{(i)} = \Psi_{(i)} H^T R_{(i)}^{-1}; \quad (2)$$

$$\Psi_{(i)} = \Psi_{e(i)} - \Psi_{e(i)} H^T [H \Psi_{e(i)} H^T + R_{(i)}]^{-1} H \Psi_{e(i)};$$

$$\Psi_{e(i)} = \Phi \Psi_{e(i-1)} \Phi^T,$$

де  $\hat{x}_{(i)}$  – отримана оцінка вектору параметрів на поточний момент часу  $t_i$ ;

$x_{e(i)}$  – екстрапольоване значення параметру;

$K_{(i)}$  – коефіцієнт підсилення фільтра;

$z_{(i)} = y_{(i)} - Hx_{e(i)}$  – значення нев'язки (помилки фільтрації);

$H$  – матриця відповідності між значеннями вимірюваних і оцінюваних параметрів;

$F, \Phi$  – відповідно, матричні оператори екстраполяції і перерахунку КМП екстраполяції (вони звичайно співпадають);

$\Psi_{(i)}$  – КМП оцінки параметрів;

$\Psi_{e(i)}$  – КМП екстраполяції;

$R_{(i)}$  – КМП вимірювань.

В ході обробки використовуються апріорні дані про помилки виміру (КМП вимірів або дисперсії). Однак статистичні характеристики погрешностей виміру в процесі супроводження цілей можуть змінюватися, наприклад, під впливом завад або якщо ціль групова (складна). Це призводить до неточного опису параметрів КМП вимірів і КМП оцінки параметрів та неоптимальності обробки, тобто до збільшення погрешностей при оцінюванні параметрів траєкторії.

У зв'язку з цим виникає необхідність визначення характеристик погрешностей виміру в ході супроводження цілі і відповідної корекції КМП.

Крім того, для підвищення точності супроводження цілей, що здійснюють маневр, необхідні

своєчасне виявлення маневру та оцінка його характеристик. На основі отриманих оцінок здійснюється корекція параметрів траєкторії цілі.

Можлива структурна схема пристрою, що реалізує адаптивний алгоритм вторинної обробки РЛС приведена на рис. 1 [3].

Робота пристрою полягає у наступному. При супроводженні цілі на вхід пристрою надходять виміряні значення координат цілі  $y_{(i)}$  в кожному  $i$ -му такті роботи РЛС.

Для визначення і уточнення статистичних характеристик погрешностей виміру в пристрої використовуються складові поточних помилок фільтрації на виході фільтру Калмана 2-го порядку, які виділяються в блоці формування вибірки.

$$Z1_{(i)} = y_{(i)} - N\hat{x}_{(i)}. \tag{3}$$

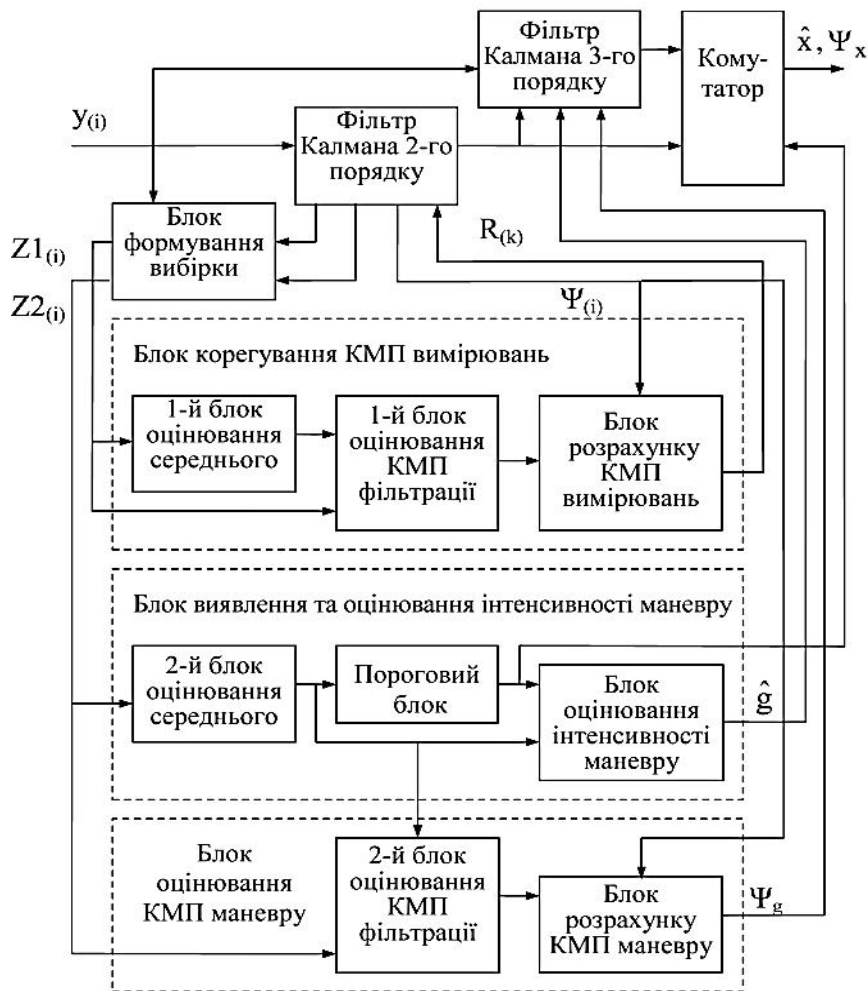


Рис. 1. Структурна схема пристрою

Це можна зробити, тому що зміна помилок вимірів проявляється в зміні помилок фільтрації (значень нев'язок).

Статистичні характеристики погрешностей вимірів оцінюються в блоці корегування КМП вимірювань. Для цього в першому блоці оцінювання

середнього в межах “ковзного вікна” розміром  $N$  визначається вибіркоче середнє значень вектору нев'язки  $Z1$ :

$$M_k [Z1] = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k Z1_{(i)}. \tag{4}$$

В першому блоці оцінювання КМП фільтрації здійснюється вибіркоче незміщене оцінювання КМП фільтрації [3]:

$$\Psi_{Z1k} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=k-N+1}^k \left( \{Z1_{(i)} - M_k[Z1]\} \times \{Z1_{(i)} - M_k[Z1]\}^T \right) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=k-N+1}^k \Psi_{Z1(i)}. \quad (5)$$

Значення  $\Psi_{Z1(i)}$  визначаються поточними величинами КМП оцінки параметрів траєкторії  $\Psi_{(i)}$  та КМП вимірювань  $R_{(i)}$ :

$$\Psi_{Z1(i)} = \Psi_{(i)} + R_{(i)}. \quad (6)$$

Далі на основі (5) і (6) в блоці розрахунку КМП вимірювань формується емпірична оцінка для КМП вимірів для моменту часу  $t_k$ :

$$R_{(k)} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=k-N+1}^k \left[ \Psi_{Z1(i)} - \frac{N-1}{N} H \Psi_{(i)} H^T \right]. \quad (7)$$

Отримані значення  $M_k[Z1]$  і  $R_{(k)}$  надходять на фільтр Калмана, де використовуються для корегування КМП вимірювань і КМП оцінювання параметрів (2).

Тим самим підвищується точність оцінювання параметрів траєкторії і ефективність супроводження цілі.

У блоці виявлення і оцінювання інтенсивності маневру та блоці оцінювання КМП маневру здійснюється виявлення маневру цілі та оцінювання його характеристик – інтенсивності маневру та КМП маневру. Це необхідно для адаптивного корегування екстрапольованих значень і КМП оцінки параметрів траєкторії.

При наявності маневру цілі з'являється складова збурювань  $K_{(i)}$  в рівнянні стану об'єкту (траєкторії цілі):

$$x_{(i)} = Fx_{(i-1)} + \Gamma W_{(i)}, \quad (8)$$

де  $W_{(i)}$  – збурюючий вплив, що характеризується, зокрема, інтенсивністю маневру  $g$ ;

$\Gamma$  – перехідна матриця збурювань.

Значення інтенсивності маневру  $g$  розподілено за нормальним законом зі середнім  $\bar{g}$  і кореляційною матрицею  $\Psi_g$ .

Маневр цілі призводить до збільшення поточних помилок фільтрації, зокрема, складової нев'язки:

$$Z2_{(i)} = \hat{x}_{(i)} - x_{e(i)}. \quad (9)$$

Для виявлення маневру цілі можна використовувати вибіркоче середнє значення нев'язки  $M[Z2]$  в "ковзному вікні" розміром  $N$ :

$$M_k[Z2] = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k Z2_{(i)}. \quad (10)$$

Вибіркове значення нев'язки формується у другому блоці оцінювання середнього. Далі в пороговому блоці здійснюється порівняння з порогом:

$$M_k[Z2] \geq Z_{\text{пор}}. \quad (11)$$

Величина порогу виявлення обирається виходячи з заданих значень ймовірності правильного виявлення і хибної тривоги. При цьому враховується, що значення  $M_k[Z2]$  підпорядковується нецентральному  $\chi^2$ -розподілу з  $r \cdot N$  ступенями свободи, де  $r$  – розмірність вектору вимірювань, а  $N$  – розмір вибірки [1].

Далі у блоці оцінювання інтенсивності маневру здійснюється оцінювання інтенсивності маневру.

Для лінійного фільтру можна записати [2]:

$$M_k[Z2] = -\phi_{(A,N)} \frac{T_N^2 g}{12}, \quad (12)$$

де  $T_N$  – інтервал накопичення вибірок при усередненні;  $\phi_{(A,N)}$  – функція усереднення:

$$\phi_{(A,N)} = \frac{(AN-1)^2 + 1 - 2(1-A)^N}{A^2 N^2}; \quad (13)$$

$A$  – коефіцієнт, який використовується при усередненні нев'язок ( $0 < A < 1$ ).

При використанні для усереднення співвідношення (10) значення  $A = 1/N$ , тоді:

$$\phi_{(N)} = 1 - 2 \left( \frac{N-1}{N} \right)^N. \quad (14)$$

На підставі співвідношень (10), (12), (14) отримаємо на виході блоку оцінювання інтенсивності маневру оцінку його інтенсивності:

$$\hat{g}_k = -\frac{12 \cdot M_k[Z2]}{\phi_{(N)} T_N^2}. \quad (15)$$

В блоці оцінювання КМП маневру здійснюється оцінювання значень КМП, обумовлених маневром цілі. Для цього у другому блоці оцінювання КМП фільтрації з використанням значень нев'язки  $Z2_{(i)}$  і оцінок середнього  $M_k[Z2]$  визначається КМП фільтрації:

$$\Psi_{Z2k} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=k-N+1}^k \left\{ Z2_{(i)} - M_k[Z2] \right\} \times \left\{ Z2_{(i)} - M_k[Z2] \right\}^T = \frac{1}{N-1} \sum_{i=k-N+1}^k \Psi_{Z2(i)}. \quad (16)$$

КМП фільтрації визначається помилками екстраполяції  $\Psi_{e(i)}$ , помилками оцінювання параметрів

$\Psi_{(i)}$  і випадковими помилками за рахунок маневру  $\Psi_{g(i)}$ :

$$\Psi_{Z2(i)} = \Psi_{(i)} + \Psi_{e(i)} + \Psi_{g(i)}. \quad (17)$$

У зв'язку з цим, у блоці розрахунку КМП маневру із (16) та (17) у результаті усереднення отримуємо:

$$\Psi_{g(k)} = \frac{1}{N-1} \times \sum_{i=k-N+1}^k \left[ \Psi_{Z2(i)} - \frac{N-1}{N} \Phi \Psi_{(i-1)} \Phi^T - \Psi_{(i)} \right]. \quad (18)$$

При виявленні маневру цілі (11) здійснюється перемикання комутатору, при цьому до виходу пристрою підключається блок фільтру Калмана 3-го порядку. Отримані оцінки інтенсивності маневру  $\hat{g}$  і КМП маневру  $\Psi_g$  надходять на цей фільтр і використовуються для корегування екстрапольованих значень параметрів і КМП оцінювання параметрів в ході рекурентної обробки, що підвищує точність оцінок параметрів траєкторії супроводжуваної цілі на виході пристрою. При цьому компенсується помилка лінійного фільтру, середнє значення якої можна оцінити як:

$$\Delta x = -\phi_{(A,N-m)} \frac{T_{N-m}^2 \hat{g}^2}{12}, \quad (19)$$

де  $T_{N-m} = t_N - t_m$ ;  $t_m$  – момент початку маневру.

Наприклад, при  $N = 4$ ;  $m = 1$ ;  $T_{N-m} = 30$  с;  $g = 10$  м/с<sup>2</sup> отримуємо з (13) та (19)  $\phi_{(A,N-m)} = 0,4$ ;  $\Delta x = 3$  км.

При середньоквадратичній помилці вимірювання координати  $x$ ,  $\sigma_x = 750$  м отримане значення

помилки  $\Delta x \geq 3\sigma_x$ , та якщо не компенсується складова за рахунок прискорення маневру, екстрапольоване значення виходить за межі стробу супроводження, який, як правило, встановлюється в межах  $\pm 3\sigma_x$ , та може призвести до зриву з супроводження.

## Висновки

Таким чином, отримані результати аналізу поточних динамічних помилок фільтрації дозволяють скорегувати значення кореляційної матриці помилок вимірювань, що здійснюються для оцінки інтенсивності маневру цілі та визначення точних оцінок параметрів траєкторії цілі при виявленні її маневру. Запропонований пристрій може бути використаний у сучасних засобах виявлення і супроводження повітряних цілей.

**Напрямами подальших досліджень** є пошук методів та синтез алгоритмів адаптивної фільтрації траєкторної інформації цілей, що виконують маневри різної інтенсивності.

## Список літератури

1. Кузьмін, С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З.Кузьмін. – К.: КВіД, 2000. – 428 с.
2. Саврасов, Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю.С.Саврасов. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.
3. Декларац. патент на корисну модель № 19892, Укр., G01S. Адаптивний пристрій фільтрації параметрів траєкторії маневруючої цілі / Челпанов А.В., Карлов В.Д. та ін. Опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1. – 3 с.

Надійшла до редколегії 23.12.2015

**Рецензент:** канд. техн. наук, проф. В.М. Закорюкін, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## АДАПТАЦИЯ УСТРОЙСТВ И АЛГОРИТМОВ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.В. Челпанов, С.О. Карпейчик, О.Ю. Прядко, В.М. Решетник

При решении задач вторичной обработки радиолокационной информации по данным РЛС вид маневра, который осуществляет цель, как правило, неизвестен. Поэтому важное практическое значение имеет синтез адаптивных алгоритмов траекторной фильтрации. В статье рассматривается возможность повышения эффективности сопровождения целей за счет адаптивной коррекции значений корреляционной матрицы ошибок измерений, а также оценок параметров траектории маневрирующей цели. Предложена структурная схема устройства, реализующего адаптивный алгоритм вторичной обработки радиолокационной информации. Алгоритм обработки информации включает процедуры своевременного обнаружения маневра цели и оценивания его интенсивности.

**Ключевые слова:** радиолокационная информация, ошибки измерения, фильтр Калмана, маневр цели, адаптивный алгоритм, корреляционная матрица.

## ADAPTATION OF DEVICES AND ALGORITHMS OF SECONDARY PROCESSING OF RADAR DATA

A.V. Chelpanov, S.O. Karpeichyk, O.Y. Priadko, V.M. Reshetnik

As a rule in the solving problems of a secondary radar processing a type of target maneuver is unknown. Therefore synthesis of adaptive filtering algorithms has important practical value. The possibility of increasing of efficiency of target tracking by adaptive correction values of the correlation matrix of measurement errors and estimations of parameters of the maneuvering target trajectory are presented in the article. The devices block diagram that realizes the adaptive algorithm of secondary radar processing is proposed. The algorithm of processing includes procedures for early detection maneuver of the target and evaluation of its intensity.

**Keywords:** radar data, measurement error, Kalman filter, maneuvering target, adaptive algorithm, the correlation matrix.