

УДК 681.396.96: 681.32

С.М. Піскунов

Харківський університет Повітряних Сил імені І. Кожедуба, Харків

## ІМОВІРНІСНИЙ ФІЛЬТР СУПРОВОДЖЕННЯ ЦІЛЕЙ

В даній статті розглянуті можливості підвищення точності оцінок параметрів траєкторії цілі з забезпеченням заданої імовірності стійкого супроводження цілі, зокрема, при її маневрі.

**Ключові слова:** фільтр Калмана, супроводження цілі, помилки фільтрації фільтр Калмана, супроводження цілі, помилки фільтрації.

## Вступ

**Постановка проблеми.** Однією з проблем у теорії вторинної обробки радіолокаційної інформації є забезпечення стійкого супроводження цілей в умовах, коли прийнята модель руху цілі не відповідає реальній траєкторії, зокрема, при маневрі цілі. В даному випадку збільшуються динамічні помилки фільтрації позначок (вимірювань координат), і відповідно, імовірність непопадання позначок в строб ідентифікації, тобто можливість зриву цілі з супроводження. Тому актуальною є проблема визначення поточних динамічних помилок фільтрації та їх використання для корекції отриманих оцінок параметрів траєкторії цілі.

**Аналіз літератури.** Для визначення і корекції регулярних складових помилок фільтрації використовуються поточні (усереднені) значення відхилення параметрів позначок (вимірювань) від екстрапольованих значень координат, зокрема значення нев'язок чи їх квадратичних форм [1, 3].

При маневрі цілі застосовуються пристрої (алгоритми) виявлення маневру та визначення його інтенсивності (прискорення маневру) з модифікацією (змінною структурою) лінійного фільтра Калмана [2]. Імовірнісний фільтр [4] забезпечує підвищення імовірності стійкого супроводження цілі за рахунок введення поточних помилок фільтрації в ланцюги зворотнього зв'язку фільтру.

**Метою роботи** є розробка алгоритму фільтрації, який забезпечує задану імовірність стійкого супроводження цілей за рахунок визначення регулярних складових помилок фільтрації, зокрема, при маневрі цілі, та їх компенсації з відповідною корекцією параметрів фільтру та оцінок параметрів траєкторії цілі.

## Викладення основного матеріалу

Для фільтрації позначок (вимірювань координат)  $x_i$  які надходять в кожному  $i$ -му циклі супроводження, і оцінки параметрів траєкторії цілі зазвичай використовується лінійний фільтр Калмана, який забезпечує мінімальні помилки фільтрації для

лінійної траєкторії, які визначаються помилками вимірювань (зокрема, дисперсією  $\sigma_x^2$ ).

Однак при невідповідності прийнятої моделі руху цілі її реальній траєкторії, зокрема, при маневрі цілі, виникають регулярні складові помилок фільтрації, які проявляються в значеннях нев'язок  $z_i$  чи їх квадратичних форм  $Q_i$  в одномірному випадку (по координаті  $x$ ):

$$z_i = x_i - x_{ei}; \quad Q_i = z_i^2 / \sigma_x^2, \quad (1)$$

де  $x_{ei}$  – поточні екстрапольовані значення параметру траєкторії.

При маневрі цілі з'являється квадратична складова у виразі для траєкторії цілі, яка визначається прискоренням маневру  $g_m$ :

$$\Delta x_i = \frac{1}{2} g_m (t_i - t_m) \quad (2)$$

де  $t_m$  – момент початку маневру.

Значення  $\Delta x_i$  визначають регулярну складову нев'язку та додаткові помилки оцінки параметрів траєкторії цілі. При непотраплянні позначки в строб ідентифікації (супроводження) через динамічні помилки фільтрації, можливо скидання траєкторії з супроводження (зокрема за логікою S не потрапляють поспіль).

Розмір строба супроводження обирається за умовами забезпечення заданої імовірності попадання цільової позначки в строб.

Зокрема, дисперсія помилок цілевказання (екстрапольованого значення)  $\sigma_{(x_e)}^2$  не повинна перевищувати заданої величини, визначеної помилками вимірювання:

$$\sigma_{(x_e)}^2 \leq \lambda^2 \sigma_x^2,$$

де  $\lambda$  задана константа.

В той же час розмір строба обмежується вимогами до селективних властивостей фільтра – імовірністю попадання в строб помилкових позначок, зокрема, за рахунок завад. Наприклад, для двомірного строба (по координатам  $x, y$ ) імовірність правильної селекції цільової позначки визначається, як [5]:

$$P_c = \frac{1}{1+2\pi\nu\sigma_x\sigma_y}; \quad (3)$$

де  $\nu$  - інтенсивність завадових позначок.

Для аналізу стійкого супроводження цілі доцільно використовувати усереднені (відфільтровані чи згладжувані) значення нев'язок  $\bar{z}_i$ :

$$\bar{z}_i = A \cdot \bar{z}_{i-1} + (1-A)z_i \quad (4)$$

де  $A$  – коефіцієнт згладжування.

Залежність  $\bar{z}_i$  від прискорення маневру цілі  $g_m$  дорівнює [3]:

$$\bar{z} = -\phi_1 \cdot (g_m T_1^2 / 12), \quad (5)$$

де  $T_i = t_i - t_m$ ;  $\phi_1 = (1-A)^2 \left[ (i-A-1)^2 + 1 - 2A^i \right] \cdot i^{-2}$ .

Дисперсія згладженої нев'язки визначається дисперсією помилок вимірювання  $\sigma_x^2$

$$\sigma_{(\bar{z})}^2 = \phi_2 \cdot \sigma_x^2,$$

де  $\phi_2 = \frac{1-A}{1+A} + A^{2(i-1)}$ . (6)

Алгоритм обробки, що пропонується передбачає перевірку імовірності попадання цільових позначок в строб супроводження шляхом порівняння поточних значень згладженої нев'язки  $\bar{z}$  із певної величини, пропорційної розміру строба:

$$|\bar{z}| \leq L \cdot \sigma_{(\bar{z})} \quad (7)$$

де  $L$  – коефіцієнт, який визначає імовірність попадання позначки в строб ( $L=2\dots 3$ ).

При виконанні умови (7) поточне значення  $\bar{z}$  використовується для уточнення елементів кореляційної матриці помилок (КМП) вимірювань  $R_i$ , КМП екстраполяції  $\psi_{ei}$ , КМП фільтрації  $\psi_i$  та коефіцієнту підсилення фільтра  $K_i$ .

Наприклад, для одномірного випадку (координат  $x$ ) дисперсія помилок екстраполяції визначиться, як

$$\sigma_{(x_e)}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_x^2 \tau^2 + 2K_{(x,\dot{x})} \cdot \tau + \frac{1}{4} \sigma_{(\bar{z})}^2 \tau^4; \quad (8)$$

$$\sigma_{(\dot{x}_e)}^2 = \sigma_{\dot{x}}^2 + \sigma_{(\bar{z})}^2 \cdot \tau^2,$$

де  $\tau$  – інтервал екстраполяції;  $\sigma_{\dot{x}}^2, \sigma_{x_e}^2$  – відповідно дисперсії вимірювання та екстраполяції швидкості.

Коефіцієнт підсилення фільтра по координаті  $x$ :

$$K_i = \frac{\sigma_{(\dot{x}_{ei})}^2}{\left( \sigma_{(\dot{x}_{ei})}^2 + \sigma_{x_i}^2 \right)}.$$

Для необхідної реакції фільтра на випадковий розподіл прискорення цілі з дисперсією  $\sigma_g^2$  коефіцієнт підсилення фільтра  $K_i$  після часу супроводження цілі  $T_0$  обмежується (фіксується) на рівні  $K_0$ , де [3]:

$$T_0 = \sqrt[5]{144 \cdot T_c \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_g^2}, \quad (9)$$

де  $T_c$  – період (цикл) супроводження.

Відповідно помилка (дисперсія) екстраполяції за рахунок помилок вимірювань в сталому режимі супроводження визначається, як

$$\sigma_{(x_e)}^2 = \frac{K_0}{1-K_0} \cdot \sigma_x^2. \quad (10)$$

При невиконанні умови (7), зокрема, при маневрі цілі, поточне значення  $\bar{z}$  використовуються для корекції поточних екстрапольованих значень параметрів (координати та швидкості):

$$\hat{x}_e = x_{ei} + \bar{z}; \quad \hat{\dot{x}}_e = \dot{x}_{ei} - \frac{1}{2} g_m T_i. \quad (11)$$

Відповідно корегуються оцінки параметрів траєкторії цілі, зокрема, для координат  $x$ :

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{ei} + K_i (x_i - \hat{x}_{ei})$$

Якщо задана імовірність попадання позначки в строб супроводження не забезпечується і після корекції поточних оцінок параметрів, розраховується менше значення періоду (циклу) супроводження  $T_c$ , при якому ця умова виконується (за рахунок зменшення помилок екстраполяції (цілевказання)), наприклад [2]:

$$T_{ci} = T_{ci-1} \cdot \left( 1 / \sqrt{\bar{z} / \sigma_x} \right)$$

Зміна періоду супроводження цілі можлива для радіолокаційних систем з електронним управлінням діаграми спрямованості.

## Висновки

Для забезпечення заданої стійкості супроводження цілі, зокрема, при її маневрі, і для зменшення помилок оцінок параметрів траєкторії необхідно проводити аналіз поточних динамічних помилок фільтрації, оцінювати імовірність стійкого супроводження цілі. На основі отриманих оцінок випадкових та регулярних складових помилок фільтрації, зокрема, нев'язок, проводиться, відповідно, уточнення елементів кореляційних матриць помилок і коефіцієнту підсилення фільтра та корекція екстрапольованих значень і оцінок параметрів траєкторії цілі. При необхідності корегується період (цикл) супроводження.

## Список літератури

1. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождения целей / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 340 с.
2. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВІЦ, 2000. – 428 с.
3. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю.С. Саврасов. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.
4. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем / А.А. Коростелев. – М.: Радио и связь, 1987. – 328 с.
5. Войтович С.А. Траекторна обробка локаційної інформації / С.А. Войтович, Х.А. Турсунходжаев. – Х.: ХУПС, 2008. – 112 с.

Надійшла до редколегії 17.01.2012

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

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ФИЛЬТР СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛИ

С.Н. Пискунов

*В данной статье рассмотрены возможности увеличения точности оценок параметров траектории маневрирующей цели с обеспечением заданной вероятности ее устойчивого сопровождения.*

**Ключевые слова:** *фильтр Калмана, сопровождение цели, ошибки фильтрации фильтра Калмана, сопровождение маневрирующей цели, ошибки фильтрации.*

## TARGET TRACKING PROBABILITY FILTER

SN Piskunov

*The possibility of increasing the accuracy of estimates of the trajectory parameters of maneuvering target with a certain probability of its stable maintenance is considered.*

**Keywords:** *Kalman filter, filtering error of Kalman filter, tracking maneuvering target filtering errors.*