

УДК 621.391.26

АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЦІЛІ З ВИЯВЛЕННЯМ МАНЕВРУ

Швець О.В., Жук С.Я.

Широке використання при вирішенні задач визначення параметрів руху об'єктів різних типів за даними траєкторних вимірювань знаходить метод калманівської фільтрації в дискретному часі. Синтезовані на його основі алгоритми траєкторної фільтрації є рекурентними і зручними для реалізації на ЕОМ. Крім того, на основі кореляційної матриці помилок прогнозу, яка розраховується під час роботи фільтру Калмана, виникає можливість визначення оптимальних розмірів стробів супроводу цілі, які є необхідною складовою при побудові алгоритмів вторинної обробки радіолокаційної інформації.

На ділянках руху цілі без маневру можна значно підвищити точність супроводу. Тому прийнято розділяти траєкторію руху цілі на ділянки руху з маневром і без нього. Для кожної з цих ділянок використовується свій алгоритм фільтрації. Управління перемиканням алгоритмів фільтрації виконується на основі виявлювача маневру. Недоліком відомого алгоритму траєкторної фільтрації з використанням двох фільтрів Калмана [1] є значна затримка виявлення закінчення маневру. Тому актуальною задачею є побудова алгоритму, який забезпечує зменшення часу на виявлення закінчення маневру і не потребує значних обчислювальних витрат.

З метою обмеження об'єму статті розглянемо побудову алгоритму оцінювання параметрів руху цілі з виявленням маневру по одній координаті, а саме висоті. При опису руху повітряної цілі маневр в горизонтальній і вертикальній площинах, як правило, моделюється окремо. Тому розгляд алгоритму оцінювання параметрів руху цілі з виявленням маневру по висоті може представляти і самостійний інтерес. У разі необхідності розглянутий підхід може бути розповсюджено і на більш складні алгоритми траєкторної фільтрації у визначеній системі координат.

Рівняння руху цілі у вертикальній площині на основі моделі другого порядку [2] можна представити у вигляді

$$u_B(k) = F_B(k, k-1)u_B(k-1) + G_B(k)\omega_{Bj}(k), \quad (1)$$

де $u_B^T(k) = (z(k), \dot{z}(k))$ - вектор стану, що включає координати висоти $z(k)$ і швидкості зміни висоти $\dot{z}(k)$ по осі Z прямокутної системи координат; $\omega_{Bj}(k)$ - шум збудження з нульовим математичним очікуванням і дисперсією σ_{azj}^2 $j = \overline{1, 2}$; $F_B(k, k-1)$, $G_B(k)$ - матриці, які мають вигляд

$$F_B(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad G_B(k) = \begin{bmatrix} T^2 \\ 2 \\ T \end{bmatrix}.$$

Дисперсія шуму збудження σ_{azj}^2 при $j=1$ відповідає руху слабо маневруючої цілі, а при $j=2$ відповідно маневруючої. Вона визначається по формулі $\sigma_{azj}^2 = \frac{a_{mzj}^2}{3}$, $j = \overline{1,2}$, де a_{mzj} , $j = \overline{1,2}$, - модуль максимального значення прискорення цілі по осі Z відповідно для кожної із гіпотез.

Рівняння спостереження у вертикальній площині можна представити у вигляді

$$u_{\text{ВИ}}(k) = H_B(k)u_B(k) + v_B(k), \quad (2)$$

де $u_{\text{ВИ}}(k) = z_{\text{И}}(k)$ - координата цілі в по осі Z , що вимірюється; $v(k)$ - помилка вимірювання висоти цілі, що є некорельованою гаусівською з нульовим математичним очікуванням і дисперсією $R(k)$; $H_B(k)$ - матриця спостереження має вигляд $H_B = [1 \ 0]$.

Теоретичне обґрунтування

На основі моделі руху (1) і рівняння вимірювання РЛС (2) алгоритм траєкторної фільтрації у вертикальній площині має вигляд

$$u_{Bj}^*(k) = F_B(k, k-1)\hat{u}_{Bj}(k-1); \quad (3)$$

$$\hat{u}_{Bj}(k) = u_{Bj}^*(k) + K_{Bj}(k)(u_{\text{ВИ}}(k) - H_B(k)u_{Bj}^*(k)); \quad (4)$$

$$P_{Bj}^*(k) = F_B(k, k-1)\hat{P}_{Bj}(k-1)F_B^T(k, k-1) + G_B(k)Q_{Bj}(k)G_B^T(k); \quad (5)$$

$$K_{Bj}(k) = P_{Bj}^*(k)H_B^T(k)(H_B(k)P_{Bj}^*(k)H_B^T(k) + R_{Bj}(k))^{-1}; \quad (6)$$

$$\hat{P}_{Bj}(k) = P_{Bj}^*(k) - K_{Bj}(k)H_B(k)P_{Bj}^*(k), \quad j = \overline{1,2}, \quad (7)$$

де $u_{Bj}^*(k)$, $\hat{u}_{Bj}(k)$ - вектори прогнозу і оцінки параметрів руху цілі у момент часу k у вертикальній площині; $K_{Bj}(k)$ - коефіцієнт посилення фільтру Калмана у вертикальній площині; $P_{Bj}^*(k)$ - кореляційна матриця помилки прогнозу у вертикальній площині; $\hat{P}_{Bj}(k)$ - кореляційна матриця помилки оцінки у вертикальній площині.

При $j=1$ рівняння (3)...(7) описують алгоритм оцінювання параметрів руху слабо маневруючої цілі, а при $j=2$ відповідно маневруючої у вертикальній площині. За наявності двох вимірювань у моменти часу $k=0$ і

$k = 1$ вектор $\hat{u}_{Bj}(1)$ і кореляційна матриця помилок $\hat{P}_{Bj}(1)$ початкової оцінки у вертикальній площині мають вигляд [2]

$$\hat{u}_{Bj}^T(1) = (z_{И}(1), \frac{z_{И}(1) - z_{И}(0)}{T}), \quad \hat{P}_{Bj}(1) = \begin{bmatrix} \sigma_z^2(1) & \frac{\sigma_z^2(1)}{T} \\ \frac{\sigma_z^2(1)}{T} & \frac{\sigma_z^2(1) + \sigma_z^2(0)}{T^2} + \sigma_{azj}^2 T^2 \end{bmatrix}, j = \overline{1, 2}.$$

Фільтр оцінювання параметрів руху слабо маневруючої цілі у вертикальній площині, що відповідає гіпотезі $j = 1$ називатимемо точним, а що використовується для оцінювання руху цілі з маневром $j = 2$ - грубим.

Перевірка попадання цілі в строби супроводу точного і грубого фільтрів вертикального каналу проводиться за правилами /1/

$$(H_B(k)u_{Bj}^*(k) - u_{И}(k))^T D_{Bj}^{-1}(k)(H_B(k)u_{Bj}^*(k) - u_{И}(k)) \leq l^2, j = \overline{1, 2}; \quad (8)$$

де $D_{Bj}(k), j = \overline{1, 2}$ - дисперсії нев'язок, які визначаються по формулі

$$D_{Bj}(k) = H_B(k)P_{Bj}^*(k)H_B^T(k) + R_B(k), j = \overline{1, 2}. \quad (9)$$

Для виділення ділянок руху різного типу використовується наступний алгоритм. На кожному такті k визначається число непопадань цілі в строби супроводу точного фільтру вертикального каналу $m_{B1}(k)$ за n_1 останніх циклів огляду, а грубого фільтру $m_{B2}(k)$ за n_2 останніх циклів огляду. Траєкторна інформація знімається з виходу точного фільтру, якщо $m_{B1}(k) = 0$. Якщо це рівняння не виконується інформація знімається з виходу грубого фільтру. Зрив супроводу відбувається при виконанні умови

$$m_{B2}(k) = n_2, \quad (10)$$

тобто при n_2 підряд непопаданнях цілі в строби супроводу грубого фільтру.

Для управління роботою точного фільтру на кожному такті k формується ознака непопадання цілі в його строб супроводу $i_{B1}(k)$. При попаданні цілі в строб супроводу точного фільтру $i_{B1}(k) = 0$, в протилежному випадку $i_{B1}(k) = 1$. Для підвищення швидкості збіжності точного фільтру, за умови непопадання в його строб відмітки цілі $i_{B1}(k) = 1$, в якості оцінки вектора стану $\hat{u}_{B1}(k)$ береться оцінка з виходу грубого фільтру $\hat{u}_{B2}(k)$. Таким чином, при маневрі цілі точний фільтр постійно корегується грубим фільтром, що запобігає його значній розбіжності, і дозволяє швидко відновити працездатність після закінчення маневру.

Результати експериментальних досліджень

Аналіз розробленого алгоритму оцінювання параметрів руху цілі з виявленням маневру виконаний за допомогою статистичного моделювання на ЕОМ. Для формування руху цілі у вертикальній площині використовувалася модель (1), (2). Траєкторія цілі у вертикальній площині на інтервалі $13 < k < 16$ містить ділянку руху з маневром з параметром $\sigma_{az2} = 40 \text{ м/с}^2$. На решті ділянок моделювався рух слабо маневруючої цілі з параметром $\sigma_{az1} = 1 \text{ м/с}^2$. СКВ помилки вимірювання $\sigma_z = 300 \text{ м}$, а темп надходження інформації $T = 10 \text{ с}$. Число періодів огляду вважалося рівним 30. Випробування проводилися по ста реалізаціях.

На рис. 1а безперервною і штриховою лініями показані залежності ймовірності виявлення маневру цілі $p_M(k)$ у вертикальній площині, розробленим алгоритмом, за умови, що число циклів огляду n_1 , в яких враховується непопадання цілі в строби супроводу точного фільтру, дорівнює відповідно $n_1 = 2$ і $n_1 = 1$. Обидва виявлювача фіксують момент початку маневру з однаковою ймовірністю. Виявлювач маневру при $n_1 = 2$ виділяє ділянку маневру більш стійко. Проте він має затримку у виявленні закінчення маневру рівну одному періоду огляду.

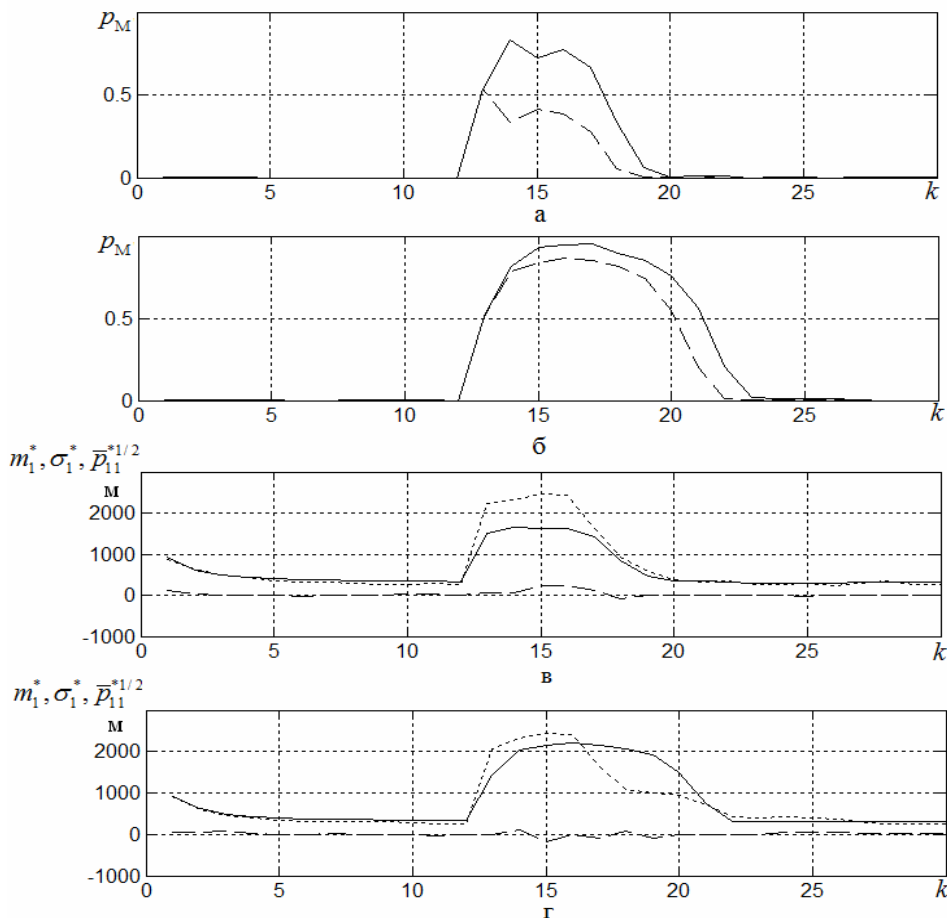


Рис.1

З метою порівняльної оцінки був також досліджений алгоритм супроводу цілі з використанням точного і грубого фільтрів, які працюють незалежно [1]. На рис. 1б безперервною і штриховою лініями показана залежність ймовірності виявлення маневру цілі в горизонтальній площині даним алгоритмом за умови, що число циклів огляду n_1 , в яких враховується непопадання цілі в строби супроводу точного фільтру, дорівнює відповідно $n_1=2$ і $n_1=1$.

Як випливає з отриманих результатів, даний алгоритм також знаходить початок маневру з високою ймовірністю. Проте він знаходить момент закінчення маневру на 3 періоди огляду пізніше, ніж розроблений алгоритм. Більш висока ефективність роботи розробленого алгоритму обумовлена тим, що в ньому враховуються зворотні зв'язки між каналами, які є в оптимальних пристроях фільтрації процесів з випадковою структурою [2], а у відомому алгоритмі вони відсутні.

На рис. 1в штриховою та штрих-пунктирною лініями відповідно показані залежності математичного очікування $m_1^*(k)$ та СКВ похибок прогноза висоти $\sigma_1^*(k)$, отриманих методом Монте-Карло, а безперервною лінією осереднене значення СКВ похибок прогноза висоти $\bar{p}_{11}^{*1/2}(k)$, розрахованих розробленим алгоритмом. На ділянках руху цілі без маневру точність екстраполяції вище, ніж на ділянці з маневром у 7 разів. На рис. 1г показані аналогічні характеристики для алгоритму супроводу цілі з використанням точного і грубого фільтрів, які працюють незалежно. Як випливає з отриманих результатів, розроблений алгоритм також забезпечує меншу тривалість перехідного процесу по точності прогнозу після закінчення маневру на 30 секунд.

Для розглянутого прикладу розроблений алгоритм забезпечує зменшення часу виявлення закінчення маневру на 3 періоди обзору порівняно з відомим алгоритм, у якому точний і грубий фільтри працюють незалежно. На ділянках руху цілі без маневру точність екстраполяції вище, ніж на ділянці з маневром у 7 разів. Більш висока ефективність роботи розробленого алгоритму обумовлена тим, що в ньому враховуються зворотні зв'язки між каналами, які є в оптимальних пристроях фільтрації процесів з випадковою структурою, а у відомому алгоритмі вони відсутні.

Література

1. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, — 1986. — 352 с.
2. Жук С.Я. Методы оптимизации дискретных динамических систем со случайной структурой / Монография. К.: НТУУ «КПІ» — 2008. — 232с.

Швець О.В., Жук С.Я. Алгоритм оцінювання параметрів руху цілі з виявленням маневру. З використанням методу калманівської фільтрації розроблено алгоритм оцінювання параметрів руху цілі з виявленням маневру, в якому враховуються зв'язки між фільтровими каналами

Ключові слова: *калманівська фільтрація, параметри цілі, маневр цілі*

Швец А.В., Жук С.Я. Алгоритм оценивания параметров движения цели с обнаружением маневра. С использованием метода калмановской фильтрации разработан алгоритм оценивания параметров движения цели с обнаружением маневра, в котором учитываются связи между фильтровыми каналами

Ключевые слова: *калмановская фильтрация; параметры цели, маневр цели*

Shvec A.V., Zhuk S.Ya. Algorithm of estimation of target movement parameters with manoeuvre detection. Using method of Kalman filtering the algorithm of estimation of target movement parameters with manoeuvre detection has been developed. The algorithm contains relations among filter channels

Key words: *Kalman filtering, target parameters, manoeuvre of target*