

УДК 623.419:681.514.3.015.44

М.Б. Бровко, Г.М. Зубрицький, А.О., Ковальчук, М.І. Рожков

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ВИБІР ФІКСОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ АЛГОРИТМІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ ПРИ СУПРОВОДЖЕННІ МАНЕВРУЮЧИХ ЦІЛЕЙ

При супроводженні сучасних маневруючих цілей багатоканальною РЛС ЗРК суттєво погіршується точність та зростає ймовірність зриву слідування. Покращити стійкість супроводження сучасних маневруючих цілей радіотехнічними слідуючими системами (РТСС) РЛС можливо з використанням адаптивних алгоритмів, або спробувати відповідним чином налаштувати параметри алгоритму слідування з фіксованими параметрами. Запропоновано методику визначення фіксованих параметрів алгоритмів супроводження, які забезпечують максимальну стійкість слідування, та приведено результати рішення задачі для алгоритму супроводження по дальності цілі.

**Ключові слова:** супроводження, стійкість, дальність, маневруюча ціль.

### Вступ

**Постановка задачі.** Для синтезу систем супроводження маневруючих цілей, часто застосовується запропонована в [1] модель руху цілі, у якій складові вектора прискорення покладаються взаємно незалежними експоненційно корельованими випадковими процесами

$$R_m(\tau) = \sigma_m^2 e^{-\frac{|\tau|}{T_m}}, \quad (1)$$

де  $T_m$  – постійна маневрування цілі;

$\sigma_m$  – середньоквадратичне відхилення прискорення цілі.

В залежності від типу цілей характеристики моделі можуть приймати значення в досить широких межах –  $\sigma_m$  від одиниць до декількох десятків метрів за секунду в квадраті, а  $T_m$  – від одиниць до десятків секунд.

Однією із проблем, є вибір фіксованих значень параметрів алгоритмів РТСС. Відомим методом здійснення вибору параметрів алгоритмів є забезпечення мінімальної помилки слідування в найбільш складних умовах. Дотримуючись даного підходу, середньоквадратичне відхилення прискорення цілі приймається максимально можливим, а постійна маневрування цілі і величина відношення сигнал/шум – мінімально можливими. Однак інтенсивний маневр відбувається досить рідко, і тому в звичайних умовах супроводження має місце істотне погіршення точності в порівнянні з потенційно досяжною [2].

Якщо фіксовані значення параметрів алгоритмів розраховуються для "середніх" умов супроводження, тобто для математичних очікувань характеристик моделей руху цілі і спостережень, то при такому підході можливе суттєве погіршення стійкості та зрив супроводження на ділянці інтенсивного маневрування цілі.

**Метою даної статті** є отримання методики рішення задачі вибору фіксованих параметрів алгоритмів РТСС, виходячи з умови забезпечення максимальної стійкості супроводження сучасних маневруючих цілей.

### Методика і результати рішення задачі вибору фіксованих параметрів алгоритму РТСС

Для рішення задачі вибору фіксованих параметрів алгоритму РТСС пропонується:

- 1) визначити діапазон можливих значень параметрів прийнятої моделі руху цілі;
- 2) для синтезованої структури алгоритму супроводження розрахувати матрицю коефіцієнтів підсилення  $\mathbf{K}(nT)$  цифрового фільтру РТСС, оптимальних за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки [3];
- 3) визначити параметри статистичних характеристик дискримінатора при різних відношеннях сигнал/шум;
- 4) користуючись шириною апертури характеристики дискримінатора знайти залежність ймовірності відсутності зриву слідування [4] від параметрів моделі руху цілі та спостережень, у відповідності до яких розраховуються фіксовані значення коефіцієнтів підсилення  $\mathbf{K}(nT)$  цифрового фільтру РТСС;
- 5) провести фіксацію значення коефіцієнтів підсилення  $\mathbf{K}(nT)$  цифрового фільтру РТСС, які забезпечують максимальну ймовірність відсутності зриву слідування.

Застосуємо запропоновану методику для вибору фіксованих параметрів алгоритму РТСС за дальністю багатоканальної РЛС. Скористаємося запропонованим критерієм для відшукування характеристик  $\sigma_{m0}^*$ ,  $T_{m0}^*$  моделі руху цілі, заснованої на гіпотезі (1).

При спостереженнях з інтервалом  $T$  модель руху цілі описується стохастичним рекурентним матричним рівнянням стану [1, 3, 5]

$$\mathbf{x}(nT + T) = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}(nT) + \mathbf{B}\eta(nT), \quad (2)$$

де  $\mathbf{x} = [x \ \dot{x} \ \ddot{x}]^T$  – вектор-стовпець стану, компонентами якого є дальність цілі  $x$ , її перша  $\dot{x}$  і друга  $\ddot{x}$  похідні;

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & \rho \end{bmatrix} \text{ – перехідна матриця стану;}$$

$$\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 1]^T \text{ – матриця збудження;}$$

$\eta(nT)$  – послідовність шумів збудження з нульовим середнім і дисперсією  $v_\eta = \sigma_m^2(1 - \rho^2)$ ;

$\rho = \exp(-T/T_m)$  – коефіцієнт кореляції значень другої похідної координати на інтервалі спостережень.

Рівняння спостережень має вигляд

$$y(nT) = \mathbf{H}\mathbf{x}(nT) + f(nT), \quad (3)$$

де  $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]$  – матриця спостережень;

$f(nT)$  – послідовність некорельованих шумів спостережень з нульовим середнім і дисперсією  $v_f$ .

Як впливає з рівнянь (2), (3), зовнішні впливи цілком визначаються характеристиками  $\sigma_m$ ,  $T_m$  моделі руху цілі і дисперсією  $v_f$  шумів спостережень.

Алгоритм супроводження, оптимальний за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки, описується наступними рекурентними рівняннями оцінювання й екстраполяції [3]

$$\begin{aligned} \hat{x}(nT) &= \\ &= \hat{x}(nT/nT - T) + \mathbf{K}(nT) [y(nT) - \mathbf{H}\hat{x}(nT)], \quad (4) \\ \hat{x}(nT + T/nT) &= \mathbf{\Phi}\hat{x}(nT), \end{aligned}$$

де  $\mathbf{K}(nT)$  – матриця коефіцієнтів підсилення алгоритму, що розраховується за наступними рекурентними формулами

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(nT) &= \\ &= \mathbf{D}(nT)\mathbf{H}^T [\mathbf{H}\mathbf{D}(nT)\mathbf{H}^T + v_f]^{-1}; \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(nT) &= \\ &= \mathbf{D}(nT) - \mathbf{D}(nT)\mathbf{H}^T [\mathbf{H}\mathbf{D}(nT)\mathbf{H}^T + v_f]^{-1} \mathbf{H}\mathbf{D}(nT); \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(nT + T) &= \\ &= \mathbf{\Phi}\mathbf{P}(nT)\mathbf{\Phi}^T + \mathbf{B}v_\eta\mathbf{B}^T, \quad (7) \end{aligned}$$

у яких  $\mathbf{P}(nT)$ ,  $\mathbf{D}(nT)$  – матриці других централь-

них моментів помилок оцінювання й екстраполяції стану відповідно.

Як впливає з рівнянь (5) – (7), значення матриці коефіцієнтів підсилення алгоритму супроводження визначаються значеннями характеристик  $\sigma_m$ ,  $T_m$  моделі руху цілі і дисперсією  $v_f$  шумів спостережень.

Якщо зазначені характеристики моделей адекватні реальним умовам, дисперсія помилки супроводження мінімальна і дорівнює елементові  $d_{11}$  матриці  $\mathbf{D}(nT)$ .

У сталому режимі вона не залежить від початкових умов  $\mathbf{D}(nT + T) = \mathbf{D}(nT) = \mathbf{D}$  і при постійних характеристиках зовнішніх впливів може бути знайдена в результаті рішення системи матричних нелінійних алгебраїчних рівнянь.

Статистичні характеристики часового дискримінатору отримані шляхом моделювання з використанням параметрів сигналів та характеристик приймального тракту РЛС [6].

Розрахунок дисперсії помилки супроводження, що має місце в результаті використання параметрично некоректної моделі можна провести методом статистичних іспитів на ПЕОМ. Його перевагою є не тільки порівняльна простота організації досліджень на сучасних ПЕОМ, але і висока вірогідність одержуваних результатів при досить великому обсязі вибірки.

Для розрахунку дисперсії помилки супроводження в стаціонарному режимі можна також застосувати спектральний метод [7].

Проведено розрахунок ймовірності відсутності зриву слідкування методом статистичних іспитів на ПЕОМ для періоду вимірювання координат 0,1с протягом інтервалу часу 100 с. Залежності ймовірності відсутності зриву слідкування від вибору фіксованих значень характеристик  $\sigma_m^*$ ,  $T_m^*$  моделі руху цілі для системи супроводження по дальності приведені на рис. 1, 2.

Отримані з використанням запропонованого критерію оптимальні значення параметрів не є середніми значеннями з області їхнього визначення, та відповідають більш важким умовам супроводження. Відношення сигнал/шум  $q^2$  суттєво впливає на стійкість супроводження цілей, але є можливість вибору компромісних значень  $\sigma_m^*$  та  $T_m^*$ .

Як впливає з отриманих залежностей, в даному випадку оптимальними можна вважати значення характеристик моделі руху цілі рівними  $\sigma_{m0}^* \approx 35 \text{ м/с}^2$ ,  $T_{m0}^* \approx 6 \text{ с}$ . Використовуючи отримані параметри можна провести розрахунок матриці фіксованих коефіцієнтів підсилення алгоритму  $\mathbf{K}(nT)$  згідно виразів (5) – (7).

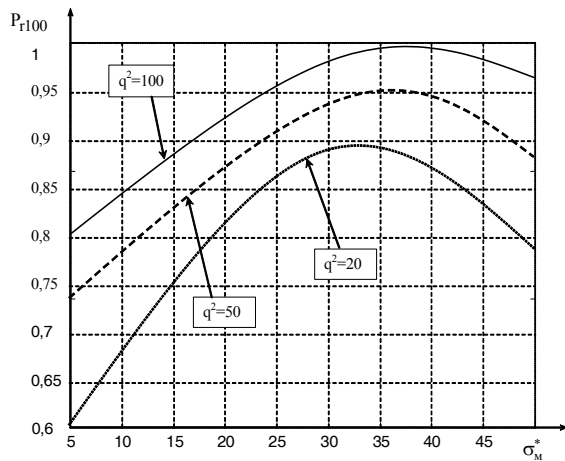


Рис. 1. Залежність ймовірності відсутності зриву слідування від  $u_m^*$

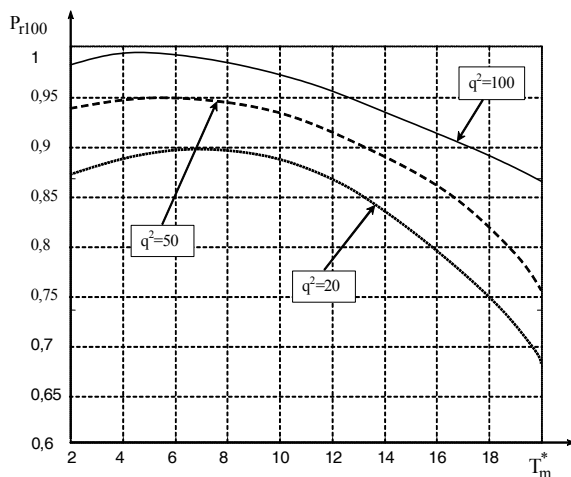


Рис. 2. Залежність ймовірності відсутності зриву слідування від  $T_m^*$

## Висновки

У випадку, коли адаптація системи до характеристик зовнішніх впливів не проводиться, вибір їх фіксованих значень доцільно проводити з урахуванням стійкості слідування. Запропонована методика дозволяє визначити значення фіксованих параметрів цифрового фільтра РТСС, при яких забезпечується краща стійкість слідування.

## Список літератури

1. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью / Р.А. Зингер // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – № 8. – С. 40-57.
2. Ковальчук А.А. Анализ чувствительности систем автосопровождения маневрирующих целей к характеристикам внешних воздействий / А.А. Ковальчук // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2001. – Вип. 7(37). – С. 81-84.
3. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: пер. с англ. / Э. Сейдж, Дж. Мелс. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
4. Оценка устойчивости сопровождения целей с помощью эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора / В.Ш. Хисматулин, А.О. Ковальчук, О.О. Сосунов, И.И. Сачук // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 2. – С. 125-132.
5. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация / С.З. Кузьмин. – К.: КВІЦ, 2000. – 430 с.
6. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В.В. Быков. – М.: Сов. радио, 1971. – 328 с.
7. Первачев С.В. Радиоавтоматика / С.В. Первачев. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.

Надійшла до редколегії 30.09.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ВЫБОР ФИКСИРОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ ПРИ СОПРОВОЖДЕНИИ МАНЕВРИРУЮЩИХ ЦЕЛЕЙ

М.Б. Бровко, Г.Н. Зубрицкий, А.А. Ковальчук, М.І. Рожков

При сопровождении современных маневрирующих целей многоканальной РЛС ЗРК существенно ухудшается точность, и возрастает вероятность срыва слежения. Улучшить устойчивость сопровождения современных маневрирующих целей радиотехническими следящими системами (РТСС) РЛС возможно с использованием адаптивных алгоритмов, или попытаться соответствующим образом настроить параметры алгоритма сопровождения с фиксированными параметрами. Предложена методика определения фиксированных параметров алгоритмов сопровождения, которые обеспечивают максимальную устойчивость слежения, и приведены результаты решения задачи для алгоритма сопровождения по дальности цели.

**Ключевые слова:** сопровождение, устойчивость, дальность, маневрирующая цель.

## CHOOSING FIXED PARAMETERS FOR ALGORITHMS OF RADIO TECHNICAL TRACKING SYSTEMS WHEN TRACKING MANEUVERING TARGETS

M.B. Brovko, G.M. Zubritskiy, A.O. Koval'chuk, M.I. Rozhkov

When multichannel radar of surface-to-air missile complex tracks maneuvering targets, track accuracy decreases and probability of track disruption rises. Track stability of modern maneuvering targets can be improved by using adaptive tracking algorithms or by trying to choose properly parameters of the fixed parameter algorithm. The method is proposed for choosing parameters of fixed parameter tracking algorithm, which provide maximum track stability and results are given with results of the problem solution for tracking by range algorithm.

**Keywords:** tracking, reliability, range, maneuvering target.