

<sup>1</sup>Ігор Іванович Сачук (канд. техн. наук, с.н.с., доцент, начальник кафедри)

<sup>2</sup>Павло Вікторович Опенько (канд. техн. наук, начальник науково-дослідної лабораторії)

<sup>1</sup>Сергій Володимирович Калина

<sup>1</sup>Леонід Васильович Кунчиков

<sup>1</sup>Дмитро Олександрович Сідоров

<sup>1</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup>Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

## ФУНКЦІОНАЛЬНІ СТРУКТУРИ ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ ТИПОВИХ СИСТЕМ СУПРОВОДЖЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ ЗЕНІТНОГО РАКЕТНОГО ОЗБРОЄННЯ

Розглянуто типові функціональні структури систем супроводження радіолокаційних станцій зенітного ракетного озброєння з цифровою обробкою сигналу розузгодження. Обґрунтовано провідне значення цифрового фільтру у реалізації системою супроводження визначеної моделі руху цілі. Отримані вирази для матриць стану, що відповідають моделям руху аеродинамічної цілі, які використовуються у системах супроводження радіолокаційних станцій зенітного ракетного озброєння. Визначені напрями подальших досліджень щодо підвищення точності супроводження аеродинамічних цілей.

**Ключові слова:** радіолокаційні станції супроводження, системи супроводження, структура, алгоритми супроводження.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Однією з задач, що вирішуються радіолокаційними станціями (РЛС) супроводження зенітного ракетного озброєння (ЗРО) для ураження аеродинамічних цілей, є здійснення їх супроводження. При цьому РЛС ЗРО здійснюють супроводження цілей за чотирма координатами: кутовими координатами, дальністю та радіальною швидкістю [1], вимірювання яких базується на властивостях розповсюдження радіолокаційних сигналів [2].

Всі системи супроводження РЛС ЗРО реалізують принцип зворотного зв'язку, але, в залежності від виду радіолокаційного сигналу та його вимірюваного параметру, а також порядку відпрацювання помилок супроводження, системи супроводження мають різну функціональну структуру [3]. Внаслідок цього системи супроводження, реалізовані в одній РЛС ЗРО, можуть відповідати різним моделям руху аеродинамічної цілі.

Отже, актуальними є задачі аналізу типових структур систем супроводження РЛС ЗРО та обґрунтування моделі руху аеродинамічної цілі.

**Аналіз літератури.** Відповідно до положень теорії оптимальної фільтрації визначено, що чим адекватніша модель руху аеродинамічної цілі її дійсному руху, тим точніше можна оцінити координати цілі [4].

Основою для побудови моделі руху цілі є другий закон Ньютона та кінематичні рівняння, що пов'язують між собою вектори прискорення,

швидкості та положення цілі. Для аеродинамічних цілей достатньо складно розрахувати результуючу силу, що діє на цілі. Крім того, для пілотованих об'єктів вона суттєво залежить від дій льотчика. Тому в більшості практичних випадків модель руху аеродинамічної цілі будують з використанням статистичної моделі прискорення цілі, що відображає особливості його можливого змінювання [5]. Однак і на теперішній час у РЛС ЗРО достатньо широко застосовуються моделі руху аеродинамічної цілі, в основу яких покладена статистична модель швидкості цілі [2]. Крім традиційних підходів, заснованих на методах лінійної фільтрації, на теперішній час широко розвиваються два напрями нелінійної фільтрації: фільтрація на основі парціальних моделей руху [6, 7] та фільтрація за Даумом [8].

**Метою статті** є аналіз типових структур систем супроводження РЛС ЗРО та обґрунтування необхідності застосування для всіх систем супроводження єдиної моделі руху аеродинамічної цілі.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Оскільки цифрова обробка сигналів розузгодження забезпечує використання моделей руху аеродинамічних цілей більш адекватних їх реальному руху, проаналізуємо типові структури лише цифрових систем супроводження РЛС ЗРО [3].

Система супроводження цілі за дальністю забезпечує часову селекцію сигналів, що

поступають у приймальний пристрій РЛС ЗРО, та вимірювання дальності цілі по часу приходу відбитого від цілі радіолокаційного сигналу. Типовою є структура системи, наведена на рисунку 1, до складу якої входять часовий дискримінатор (ЧСД), перетворювач напруга-код (ПНК), цифровий фільтр (ЦФ), формувач контрольного діяння (ФКД). Часовий дискримінатор формує напругу, яка залежить від часового розузгодження між часовим положенням стику стежучих імпульсів і часом запізнювання енергетичного центру відбитого від цілі радіолокаційного сигналу. Формувач контрольного діяння містить в собі генератор імпульсів (ГІ) і перетворювач код-затримка (ПКЗ).

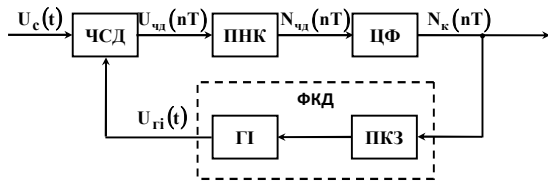


Рис. 1. Типова структура системи супроводження цілі за дальністю

Система супроводження цілі за радіальною швидкістю забезпечує частотну селекцію сигналів, що поступають у приймальний пристрій РЛС ЗРО, та вимірювання радіальної швидкості цілі по частоті Доплера. Типовою є структура системи, наведена на рисунку 2, до складу якої входять змішувач (ЗМ), підсилювач проміжної частоти (ППЧ), частотний дискримінатор, ПНК, ЦФ, ПКН, гетеродин (Г). Частотний дискримінатор (ЧД) формує напругу, величина і полярність якої визначається величиною і напрямком частотного розузгодження між поточним значенням проміжної частоти сигналу і її номінальним значенням.

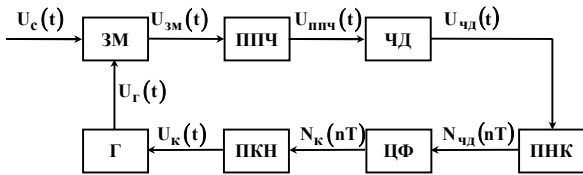


Рис. 2. Типова структура системи супроводження цілі за радіальною швидкістю

Система супроводження цілі за кутовими координатами забезпечує просторову селекцію сигналів, що поступають у приймальний пристрій РЛС ЗРО, та вимірювання кутових координат цілі. Типовою є структура системи, наведена на рисунку 3, до складу якої входять пеленгаційний пристрій (ПП) і виконавчий пристрій (ВП). Пеленгаційний пристрій формує опорний напрям і сигнали кутових розузгоджень між опорним напрямом і напрямом на ціль у двох взаємно перпендикулярних площинах. До складу ПП належать антенно-фідерна система (АФС) та елементи приймального пристрою (ПрП). У випадку цифрової обробки сигналу розузгодження виконавчий пристрій містить ПНК, ЦФ та блоки,

які забезпечують перетворення цифрового керуючого коду у кутове положення опорного напрямку.

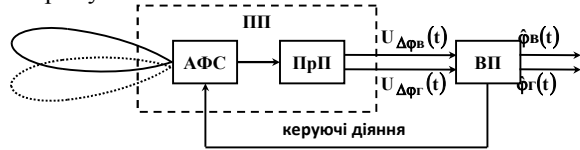


Рис. 3. Типова структура системи супроводження цілі за кутовими координатами

Відповідно до викладеного всі розглянуті вище цифрові системи супроводження РЛС ЗРО незалежно від вимірюваного параметру радіолокаційного сигналу містять дискримінатор (пристрій порівняння), перетворювач напруга-код, цифровий фільтр та формувач контрольного діяння (рисунки 4).



Рис. 4. Типова структура узагальненої системи супроводження

Дискримінатор забезпечує формування сигналу розузгодження. Причому в режимі супроводження всі системи працюють в області малих розузгоджень, де дискримінаційна характеристика є лінійною, а флукуаційна характеристика практично постійною [2]. ПНК здійснює часову дискретизацію сигналу розузгодження та квантування за рівнем дискретизованого сигналу.

Цифровий фільтр забезпечує стійкість та необхідні показники якості функціонування системи в цілому. Причому він відповідно до реалізованої моделі руху цілі здійснює розрахунок оцінки координати цілі, екстрапольованого на момент наступного радіоконтакту з ціллю значення її координати та цифрового керуючого коду. Формувач контрольного діяння відповідно до цифрового керуючого коду забезпечує формування контрольного діяння, що подається на дискримінатор.

Таким чином, основним елементом всіх систем супроводження РЛС ЗРО, який визначає точність супроводження, є цифровий фільтр. Його структура зазвичай задається [4] рівнянням оцінювання

$$\hat{\bar{x}}(nT) = \bar{x}_e(nT) + K(nT)[x_f(nT) - H\bar{x}_e(nT)], \quad (1)$$

та рівнянням екстраполяції

$$\bar{x}_e(nT + T) = P\hat{\bar{x}}(nT), \quad (2)$$

де  $\hat{\bar{x}}(nT)$  – оцінка вектору стану цілі;

$\bar{x}_e(nT)$  – екстрапольоване на момент часу  $nT$  значення вектору стану цілі;

$K(nT)$  – вектор коефіцієнтів підсилення цифрового фільтру;

$x_f(nT) - H\bar{x}_e(nT)$  – незв’язність вимірювань на виході дискримінатора;

$P$  – матриця стану.

Теорема Калмана також дозволяє розраховувати значення коефіцієнтів підсилення на кожному кроці:

$$K(nT) = D_e(nT)H^T [HD_e(nT)H^T + D_f]^{-1}, \quad (3)$$

де

$$D_e(nT + T) = PD(nT)P^T + QD_\eta Q^T - \quad (4)$$

матриця дисперсій помилок екстраполяції;

$$D(nT) = [I - K(nT)H]D_e(nT) - \quad (5)$$

матриця дисперсій помилок оцінювання

$H$  – матриця спостережень;

$D_f$  – дисперсія шумів спостереження;

$Q$  – матриця збудження.

Вид рівнянь оцінювання (1) та екстраполяції (2) відповідає реалізованій у системі супроводження моделі руху цілі. Причому, як випливає з виразів (1) – (5), елементом, що визначає структуру системи супроводження, є матриця стану цілі.

На теперішній час для систем супроводження по дальності широко використовуються модель експоненційно корельованих швидкостей цілі, модель некорельованих прискорень цілі та модель експоненційно корельованих прискорень цілі. Їм відповідають такі матриці стану цілі:

$$P_{\text{екшв}}^r = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & \rho \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$P_{\text{нкпр}}^r = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$P_{\text{екпр}}^r = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & \rho \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Для систем супроводження по радіальній швидкості використовуються модель Вінеровських прискорень цілі та модель експоненційно корельованих прискорень цілі. Їм відповідають наступні матриці стану цілі:

$$P_{\text{впр}}^v = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$P_{\text{екпр}}^v = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & \rho \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для систем супроводження по кутовій координаті використовуються такі ж моделі, що й для систем супроводження по дальності. Причому для моделі експоненційно корельованих швидкостей цілі та модель некорельованих прискорень цілі матриці стану визначаються такими ж виразами

$$P_{\text{екшв}}^\phi = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & \rho \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$P_{\text{нкпр}}^\phi = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

а для моделі експоненційно корельованих прискорень цілі матриця стану урахує зв’язок лінійного та кутового прискорень цілі:

$$P_{\text{екпр}}^\phi = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & \frac{T}{r} \\ 0 & 0 & \rho \end{pmatrix}, \quad (13)$$

де  $r$  – дальність цілі.

У виразах (6), (8), (10), (11), (13) параметр кореляції

$$\rho = 1 - \frac{T}{T_m} \quad (14)$$

визначається значенням середнього часу кореляції  $T_m$  швидкості змінювання або прискорення відповідної координати цілі.

Слід відзначити, що з виразів (8), (10) випливає, що при використанні для систем супроводження цілі за дальністю та радіальною швидкістю єдиної моделі руху цілі – моделі експоненційно корельованих прискорень – ці системи супроводження будуть погоджені між собою. Доцільність використання цієї моделі експоненційно корельованих прискорень також обґрунтовується більшою адекватністю цієї моделі реальному протіканню процесу змінювання прискорення цілі з часом. Адекватність цієї моделі руху цілі на відміну від інших моделей, що розглянуті вище, обумовлює доцільність її використання і у системах супроводження цілі за кутовими координатами.

Цифрова обробка сигналів розузгодження у системах супроводження РЛС ЗРО дозволяє використовувати більш складні багатогіпотезні алгоритми оцінювання та екстраполяції, орієнтовані на урахування можливих видів маневру аеродинамічної цілі [5]. Однак, матриці стану таких систем повинні урахувати необхідність ідентифікації факту виконання ціллю маневру визначеної інтенсивності. Практична реалізація таких алгоритмів потребує прийняття рішення про вид маневру цілі на поточний момент часу у багатовимірному просторі ознак [9].

Слід відзначити, що використання надширокосмугових сигналів та методу синтезованих апертур дає можливість суттєво підвищувати точність супроводження аеродинамічних цілей [10]. Проте питання обґрунтування структури супроводження для таких систем являє собою перспективний напрям подальших досліджень.

Таким чином, проведений аналіз типових систем супроводження РЛС ЗРО з цифровою обробкою сигналу розузгодження. Доведено, що системи супроводження цілі за дальністю, радіальною швидкістю та кутовими координатами мають однотипну структуру, ключовим елементом якої є цифровий фільтр, що забезпечує реалізацію алгоритму оцінювання та екстраполяції відповідно до обраної моделі руху цілі. Отримані вирази для матриць стану, що відповідають моделям руху

аеродинамічної цілі, які використовуються у системах супроводження РЛС ЗРО. Визначені

напрями подальших досліджень щодо підвищення точності супроводження аеродинамічних цілей.

### Література

1. Неупокоев Ф.К. Стрельба зенитними ракетами. – М.: Воениздат, 1980. – 344 с.
2. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, С.Т.Багдасарян, А.С. Маляренко и др.; Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
3. Ковальчук А.О. Системи керування. Частина 1. Типові системи автоматичного керування / А.О. Ковальчук, І.І. Сачук, О.О. Сосунов та ін.; За заг. ред. О.О. Сосунова. – Х.: ХУПС, 2013. – 316 с.
4. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
5. Хісмагулін В.Ш. Основні проблеми практичного застосування радіотехнічних слідкуючих систем, що синтезовані на основі багатоальтернативної моделі руху об'єкта / В.Ш. Хісмагулін, І.І. Сачук, О.О. Сосунов, П.В. Потелешенко // Системи обробки інформації. – 2007. – № 8(66). – С. 110–114.
6. Crisan D., Douset A. A survey of convergence results on particle filters for practitioners. – IEEE Transactions on Signal Processing. – 2002. – Vol. 50. – pp. 736 – 746.
7. Сачук І.І. Реалізація паралельної фільтрації результатів вимірювань у системах супроводження зенітних ракетних комплексів // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 4(21). – С. 55–57.
8. Daum F. Nonlinear Filters: Beyond the Kalman Filter. – IEEE A&S System Magazine. – 2005. – Vol. 20. – № 8. – Part 2. – pp. 57-68.
9. Васильєв В.А. Структура простору ознак та методика розрахунку ймовірності правильного прийняття рішення при ідентифікації моделі руху об'єкта за результатами вимірювань / В.А. Васильєв, І.І. Сачук, С.В. Селезньов, А.С. Чопенко // Системи обробки інформації. – 2012. – № 3(101). – Т. 2. – С. 18–21.
10. Sachuk I.I. UWB Signals, SA Perspectives in Radar Guidance / I.I. Sachuk; V.M. Orlenko; Y.D. Shirman // 3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2006. – pp. 133-135.

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМЫ РОБОТЫ ТИПОВЫХ СИСТЕМ СОПРОВОЖДЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ЗЕНИТНОГО РАКЕТНОГО ВООРУЖЕНИЯ

<sup>1</sup>Игорь Иванович Сачук (канд. техн. наук, с.н.с., доцент, начальник кафедры)

<sup>2</sup>Павел Викторович Опенько (канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории)

<sup>1</sup>Сергей Владимирович Калина

<sup>1</sup>Леонид Васильевич Кунчиков

<sup>1</sup>Дмитрий Александрович Сидоров

<sup>1</sup>Харковський національний університет Воздушних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup>Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ, Україна

Рассмотрены типовые функциональные структуры систем сопровождения радиолокационных станций зенитного ракетного вооружения с цифровой обработкой сигнала рассогласования. Обосновано ведущее значение цифрового фильтра в реализации системой сопровождения определенной модели движения цели. Получены выражения для матриц состояния, соответствующих моделям движения аэродинамической цели, которые используются в системах сопровождения радиолокационных станций зенитного ракетного вооружения. Определены пути дальнейших исследований по повышению точности сопровождения аэродинамических целей.

**Ключевые слова:** радиолокационные станции сопровождения, системы сопровождения, структура, алгоритмы сопровождения.

## FUNCTIONAL DIAGRAMS AND OPERATION ALGORITHM OF TYPICAL TRACKING SYSTEM OF TRACKING RADAR OF ANTI-AIRCRAFT MISSILE ARMAMENT

<sup>1</sup>Igor I. Sachuk (PhD, Senior Researcher, Associate Professor, chief of department)

<sup>2</sup>Pavlo V. Openko (PhD, chief of research laboratory)

<sup>1</sup>Serhij V. Kalyna

<sup>1</sup>Leonid V. Kunchykov

<sup>1</sup>Dmitriy A. Sidorov

<sup>1</sup>Ivan Kozhedub Kharkiv National University of Air Force

<sup>2</sup>National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovsky, Kyiv, Ukraine

Typical functional diagram of tracking system of tracking radar of anti-aircraft missile armament with digital processing of error signal are considered. It's showed that independent of the measurable parameters of radio signal all tracking system consist of discriminator, voltage-to-number converter, digital filter and monitor act former. The discriminator forms error signal. The voltage-to-number converter provides time sampling and amplitude quantization. The digital filter provides stability and necessary quality index of the system operation in general. The monitor act former transform digital control code to monitor act which arrives to discriminator.

The leading place of digital filter in the performance of defined target movement model by tracking system is based. The digital filter structure is defined by the target movement model. The general form of estimation equation and extrapolation equation is brought. The equations for calculation of amplification gain by the extrapolation variance matrix and estimation variance matrix are also brought.

The state matrix equations for target movement model used in tracking system of tracking radar of anti-aircraft missile armament are obtained. For the range tracking system the state matrix equations for model of exponential correlated target velocity model of uncorrelated acceleration and model of exponential correlated target acceleration are obtained. For the radial velocity tracking system the state matrix equations for model of Viner acceleration and model of exponential correlated target acceleration are obtained. For the angular tracking system the state matrix equations for model of exponential correlated target velocity model of uncorrelated acceleration and model of exponential correlated target acceleration are obtained.

The ways of further research for improvement of target tracking accuracy are defined. The first of them is use multi hypothesis target movement model with maneuver identification. The second is use ultra wideband signals and inverse aperture synthesis.

**Keywords:** tracking radar, tracking system, functional diagram, tracking algorithm.

### References

1. **Neypokoev F.K.** (1980), Fighting by anti-aircraft missile [Strelba zenitnui raketami]. – Moscow, Military Publishing, 1980. – 344 p.
2. **Shirman Y.D.** (2007), Radioelectronic systems: building foundation and theory. Reference book [Radioelektronne sistemu: osnovu postroenijz i teorija. Spravochnik] / Y.D. Shirman, S.T. Bagdasarjan, A.S. Maljarenko ...; edit by Y.D. Shirman. – Moscow: Radiotechnics. – 512 p.
3. **Kovalchuk A.O.** (2013), Control system. Part 1. Typical automatic control system / A.O. Kovalchuk, I.I. Sachuk, O.O. Sosunov...; edit by O.O. Sosunov. – Kharkiv.: Kharkiv National University of Air Force. – 316 p.
4. **Andrew P. Sage**, James L., (1976) Melsa Estimation Theory with Applications to Communications and Control [Teorija ocenivanija i ee primenenie v svjazi i ypravlenii]: – Moscow: Communication, 1976. – 496 p.
5. **Hismatulin V.Sh.** (2007), The main problems of practical usage of electronic tracking systems synthesized on the basis of multialternative model of the object movement [Osnovni problemu praktuchnogo zastosyvannja radiotexnichnux slidkyjychix system, sho sintezovani na osnovi bagatoalternativnoj modeli ryxy ob'ekta] / V.Sh. Hismatulin, I.I. Sachuk, O.O. Sosunov, P.V. Poteleshenko // Information Processing Systems, Vol. 8(66). – pp. 110–114.
6. **Crisan D.**, Douset A. A survey of convergence results on particle filters for practitioners. – IEEE Transactions on Signal Processing.– 2002. – Vol. 50. – pp. 736 – 746.
7. **Sachuk I.I.** (2015), The practical usage of parallel filtration of measuring results in tracking systems of surface to air complexes [Realizacija paralelnoj filtraciji rezyltatov vumiryvan v sistemax syprovodgennja zenitnux raketnux kompleksiv] // Science and Technology of the Air Force of Ukraine, Vol. 4(21)., pp 55–57.
8. **Daum F.** Nonlinear Filters: Beyond the Kalman Filter. – IEEE A&S System Magazine. – 2005. – Vol. 20. – № 8. – Part 2. – pp. 57-68.
9. **Vasilyev V.A.** (2012), The structure of signature space and method for calculating the correct decision probability of the object's movement model identification by measurement results [Stryctyra prostory oznak ta metodika rozraxyvky jmovirnosti pravilnogo prujnjattja rishennja pri identifikacii modeli ryxy ob'ekta za rezyltatami vumirjyvan] / V.A. Vasilyev, I.I. Sachuk, S.V. Seleznev, A.S. Chopenko // Information Processing Systems, Vol. 3(101). – Part. 2. – pp. 18–21.
10. **Sachuk I.I.** UWB Signals, SA Perspectives in Radar Guidance / I.I. Sachuk; V.M. Orlenko; Y.D. Shirman // 3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2006. – pp. 133-135.