

Теоретичні основи розробки систем озброєння

УДК 621.396.96

О.О. Абраменко, М.М. Заріцький, А.В. Челпанов, А.Ф. Шевченко

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РЛС З ФАЗОВАНОЮ АНТЕННОЮ РЕШІТКОЮ

Розглянуто зміст основних операцій та робота складових системи яка реалізує керування режимом супроводження цілей багатофункціональної РЛС з фазованою антенною решіткою. Система передбачає адаптацію до змін потоку цілей які супроводжуються та параметрів їхніх траєкторій (при маневрі), шляхом врахування пріоритету цілей та адаптацію до змін у точності поточних поодиноких вимірювань.

Ключові слова: багатофункціональна РЛС, фазована антенна решітка, супроводження цілей, адаптація.

Вступ

Постановка проблеми. Для РЛС з механічним скануванням діаграми спрямованості (ДС) основні задачі отримання та обробки радіолокаційної інформації (РЛІ) вирішуються, як правило, при реалізації жорсткої програми огляду з одним типом зондувального сигналу. В РЛС з фазованими антенними решітками (ФАР) є можливість гнучкого та більш швидкого управління оглядом в заданій зоні відповідальності. В таких радіолокаторах є можливість використання різних видів сигналів (модульованих та немодульованих), при цьому забезпечується більш ефективно розв'язання задач обробки радіолокаційної інформації (РЛІ) за рахунок багатофункціональності [1].

Отримання та обробка РЛІ здійснюється в різних режимах роботи, останні як правило складаються із наступних операцій [1]:

- 1) режим огляду та виявлення;
- 2) режим супроводження та оцінки параметрів траєкторії;
- 3) режим класифікації типу цілі;
- 4) режим уточнення параметрів руху цілі;
- 5) режим функціонального контролю (ФК).

Для кожного з режимів роботи багатофункціональної РЛС з ФАР мають бути визначені відповідні алгоритми керування: положенням ДС, параметрами зондувальних сигналів, обробки РЛІ та використання її результатів. Відповідні алгоритми режимів роботи є складовими комплексного алгоритму функціонування РЛС, який, як правило, реалізується по «жорсткій» (заздалегідь визначеній) програмі. Однак більш ефективними є гнучкі (адаптивні) алго-

рми, які враховують можливість змін в цільовій і завадовій обстановки в зоні огляду РЛС з ФАР та змін в її експлуатаційних характеристиках.

Тому задача пошуку адаптивних алгоритмів реалізації різноманітних режимів роботи багатофункціональних ФАР є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки до режиму супроводження цілей висуваються підвищенні вимоги до точності вимірювань та роздільної здатності, тому для його реалізації використовуються, як правило, складні радіолокаційні сигнали [1; 8]. При цьому при розподілі обмежених енергетичних та часових ресурсів багатофункціональної РЛС з ФАР в режимі супроводження повинні виконуватись наступні типові вимоги [1–9]:

– можливість супроводження всіх цілей, що знаходяться в зоні відповідальності РЛС, або, при масованому ударі, найбільш важливих (небезпечних) цілей;

– виділення необхідних часу та енергії зондування в кожному циклі супроводження для забезпечення заданої точності вимірювання координат;

– виділення необхідної кількості циклів супроводження по кожній цілі за час її спостереження для забезпечення заданої точності оцінки параметрів траєкторії та інші.

Метою цієї статті є аналіз основних операцій та складових пристрою, що реалізує керування режимом супроводження цілей багатофункціональної РЛС з ФАР.

Виклад основного матеріалу

Структурна схема пристрою, що реалізує алгоритм керування режимом супроводження цілей ба-

гатофункціональної РЛС з ФАР може мати вигляд наведений на рис. 1 [4].

На вхід вузла обробки радіолокаційної інформації надходять вимірні значення координат цілей (параметри опорних точок траєкторії) X_{oi} в дискретні моменти часу $t_i, i = 1, 2, 3, \dots$. Вузол здійснює фільтрацію вимірювань в фільтрі Калмана та оцінку вектору поточних параметрів траєкторії цілей X_{Ti} та кореляційної матриці помилок (КМП) вимірювань ψ_i :

$$\hat{X}_i = X_{ei} + K_i (X_{oi} - X_{ei}), \quad (1)$$

де \hat{X}_i – оцінки параметрів траєкторії на момент часу t_i ; X_{ei} – екстрапольовані значення вектору вимірюваних параметрів; $K_i = \psi_i R_i^{-1}$ – коефіцієнт посилення фільтру, обумовлений значеннями елементів КМП оцінок параметрів траєкторії ψ_i та вагою (точністю) вимірів, що визначаються КМП помилок вимірювань R_i .



Рис. 1. Структурна схема вузла керування режимом супроводження багатofункціональної РЛС з ФАР

Визначення пріоритетів на супроводження цілей здійснюється у відповідності до обраного критерію (групи критеріїв) у відповідності до завдань які покладено на багатofункціональну РЛС з ФАР (блок 2, рис. 1).

У відповідності до визначеного пріоритету цілей складається розклад заявок обслуговування, тобто послідовність їхнього супроводження (блок 3, рис. 1). Окрім того на вхід блоку розподілу заявок надходять заявки на супроводження цілей які знов виявлено.

В блоці оцінки інтенсивності потоку цілей (блок 5, рис. 1) визначається кількість цілей, які знаходяться в режимі супроводження. Якщо вона перевищує перепускную здатність РЛС в режимі супроводження, то здійснюється групування цілей (блок 6, рис. 1). Операція групування передбачає, що цілі з близькими параметрами руху (по дальності, кутовим координатам та радіальній швидкості) об'єднуються в групи які

супроводжуються як єдина опорна траєкторія (ЄОТ). Побудова ЄОТ дозволяє більш точно визначити кінематичну поведінку групової цілі (ГЦ). Останнє важливо при супроводженні балістичних цілей. Окрім того, такий підхід дозволяє виявляти цілі, які відокремлюються від групи в ході маневру [2]. Критерієм групування цілей може бути виконання умови:

$$|X_i - X_j| \leq \Delta X_d, \quad (2)$$

де X_i, X_j – вектори параметрів траєкторії відповідно i -ї та j -ї цілі зі складу ГЦ; ΔX_d – припустимі значення розходжень в параметрах.

З метою оцінки динамічних помилок супроводження цілей здійснюється фільтрація параметрів траєкторії (блок 7, рис. 1). В якості динамічних помилок супроводження цілей можна використовувати значення нев'язок Z_i між вимірюваними X_0 та екстрапольованими X_e значеннями параметрів, або їх квадратичних форм Q_i [2]:

$$\begin{aligned} Z_i &= X_{oi} - X_{ei}; \\ Q_i &= Z_i^T P_i^{-1} Z_i, \end{aligned} \quad (3)$$

де $P_i = \psi_i + R_i$.

Аномальні значення динамічних помилок можуть виникати за наявності відмов систем РЛС (апаратних чи алгоритмічних) чи при маневрах цілей. Виявлення маневру цілі може здійснюватися по значенням і характеру зміни нев'язок Z_i чи їх квадратичних форм Q_i (блок 8, рис. 1). В загальному випадку радіальна швидкість цілей які супроводжуються буде змінюватися, том мірою інтенсивності маневру може бути обране прискорення маневру g . Оцінку поточного значення прискорення може бути здійснено по згладженим значенням нев'язок \bar{Z}_n :

$$\bar{Z}_n = (1 - A) \bar{Z}_{n-1} + A Z_n, \quad (4)$$

де A – коефіцієнт згладжування.

При виявленні маневру в момент часу t_m оцінка прискорення маневру \hat{g}_m на етапі сталого супроводженні цілі може бути отримана по значенню згладженої нев'язки зі співвідношення [3]:

$$\hat{g}_m = \frac{\bar{Z} \cdot B_{x0}}{\phi_2(A, n - m) \cdot \Delta t_c}, \quad (5)$$

де B_{x0} – фіксований коефіцієнт посилення фільтру при згладжуванні значень швидкості \dot{X} ;

$\phi_2(A, n - m) = 1 - (1 - A)^{n - m}$ – функція, що згладжує, $(n - m)$ – число згладжених опорних точок після початку маневру.

Значення прискорення маневру g використовується при формуванні екстрапольованого значення

параметра в процесі фільтрації (вузол 1, рис. 1) у вигляді:

$$X_{ei} = \hat{X}_{i-1} + \Delta t_e \hat{X}_{i-1} + \frac{1}{2} \Delta t_e^2 g, \quad (6)$$

де $\Delta t_e = t_i - t_{i-1} = \Delta t_c$.

Відомо, що при виявленні маневру доцільно зменшити період супроводження цілі [1] Δt_c . Його тривалість може бути визначена зі співвідношення, яке враховує динамічних помилки (3) та інтенсивності маневру цілі (5) (блок 9, рис. 1) [3]:

$$\Delta t_c \leq \frac{\sqrt{(\phi \Delta_c)^2 - \sigma_x^2}}{\sigma_x}, \quad (7)$$

де Δ_c – строб супроводження; ϕ – коефіцієнт, який визначає ймовірність попадання екстрапольованого значення X_e в строб супроводження Δ_c ($\phi = 0, 2 \dots 0,5$); $\sigma_{x_1}^2, \sigma_{x_2}^2$ – відповідно дисперсії помилок вимірювань координати та її швидкості Δt_i .

Вираз (7) може бути перетворений до вигляду:

$$\Delta t_c \leq \sqrt{2 \left(\frac{2 + \phi^2}{1 + \phi^2} - \frac{2}{\sqrt{1 + \phi^2}} \right) \frac{\Delta_c}{\hat{g}}}, \quad (8)$$

де \hat{g} – оцінка прискорення маневру цілі.

За необхідністю разом із оцінкою супроводження може бути сформована команда для перемикавання на фільтр Калмана більш високого порядку у вузлі обробки радіолокаційної інформації. Перемикавання має здійснюватися з урахуванням поточного значення прискорення маневру цілі g .

У випадку значного збільшення дисперсії динамічних помилок супроводження цілі може бути сформована команда на перевірку працездатності систем багатофункціональної РЛС. Відповідно до команди може призначатися режим проведення ФК (блок 10, рис. 1) у вільних часових циклах роботи РЛС, наприклад шляхом формування сигналів контрольних цілей.

При маневрі цілі з прискоренням g , значення нев'язки по дальності Z_{Ri} в момент часу t_i може бути визначено як [3]:

$$Z_{Ri} = \Phi_i \frac{\Delta t_c (i - m)^2 g}{12}, \quad (9)$$

де: Φ_i – функція згладжування; m – номер опорної точки траєкторії, що відповідає початку маневру цілі.

Як показали обчислення зі збільшенням періоду супроводження цілі, дисперсія помилки вимірювання координат цілі зростає тим більше, чим більше прискорення маневру цілі.

В якості прикладу на рис. 2 наведено залежності дисперсії помилки вимірювання дальності до цілі яка супроводжується від періоду супроводження.

При наявності групових цілей перехід на супроводження єдиної опорної траєкторії ГЦ дає можливість підвищити перепускную здатність РЛС в режимі супроводження, а при балістичній траєкторії більш точно визначити її параметри [5].

Оцінка енергетичних витрат необхідних на здійснення режиму супроводження цілей може здійснюватися у відповідності до наступних факторів:

- дальність до цілі;
- характеристики цілі (її пріоритет, наявність маневру, склад цілі – одиночна чи групова);
- інтенсивність потоку цілей;
- наявність контрольних цілей в режимі ФК та ін.

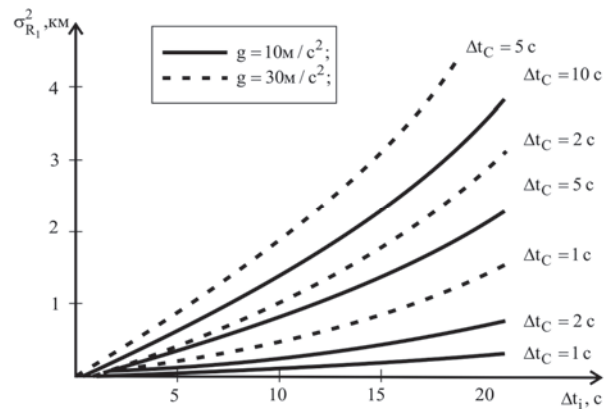


Рис. 2. Залежність дисперсії помилки оцінки дальності до цілі від часу супроводження цілі багатофункціональної РЛС з ФАР

Енергія яка виділяється на супроводження цілі, визначається кількістю тактів зондування цілі в циклі супроводження та потужністю зондувальних сигналів. Потужність зондувальних сигналів, в свою чергу, визначається кількістю елементів ФАР які беруть участь у формуванні зондувального сигналу (повний розкриття ФАР або його частина) та обраним видом амплітудно-фазового розподілу в антенній решітці [7]. Відповідно з розподілом заявок на супроводження цілей та визначеними характеристиками супроводження: періодом обслуговування цілей; енергією зондування; часом на проведення ФК здійснюється розподіл наявного часового та енергетичного ресурсу на реалізацію режиму супроводження цілей (вузол 11, рис. 1).

Своєчасне вироблення команди на проведення ФК при збільшенні динамічних помилок в режимі супроводження дозволяє підвищити коефіцієнт готовності багатофункціональної РЛС з ФАР за рахунок зниження часу відновлення працездатності T_B . Коефіцієнт готовності може бути визначений зі співвідношення [6]:

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_B}, \quad (10)$$

де T_k – середній час напрацювання на відмову; $T_B = T_k + T_{II} + T_p$; T_k – середній час на проведення ФК; T_{II} – середній час існування прихованої відмови; T_p – середній час ремонту.

Контроль функціонування може бути проведений у вільних часових циклах роботи каналу супроводження, якщо потік цілей менше пропускну здатності РЛС в режимі супроводження. При цьому обробка контрольної інформації може здійснюватися паралельно з обробкою реальних цілей. Тим самим зменшуються складові часу контролю T_k та існування прихованої відмови T_{II} .

Висновки

1. За результатами аналізу типових режимів роботи багатофункціональної РЛС з ФАР визначено особливості реалізації функціонального режиму супроводження цілей.

2. Проведено аналіз основних операцій та складових системи, що реалізує керування режимом супроводження цілей багатофункціональної РЛС з ФАР. Система передбачає адаптацію до цільової обстановки в зоні огляду, зокрема: до змін потоку супроводжуваних цілей та параметрів їхніх траєкторій (при маневрі) шляхом врахування пріоритету (ступеню небезпеки) цілей та до змін точності поточних поодиноких вимірювань, наприклад, за рахунок впливу завад та умов поширення радіохвиль.

3. Наведено основні співвідношення для потрібного періоду супроводження цілі (інтервалу екстраполяції в ході рекурентної обробки результатів вимірювань) за якого забезпечується задана точність побудови параметрів траєкторії та сталість супрово-

дження цілей з урахуванням характеристик маневру.

Список літератури

1. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: пер. с англ. / 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. Патент на корисну модель №30978, Україна, МПК G01S 13/52. Система управління функціональними режимами РЛС / А.В. Челпанов та ін. № 200710623. Заяв. 25.09.2007. Опубл. 25.03.2008. Бюл. № 6.
5. Челпанов А.В. Возможности повышения эффективности сопровождения сложных целей в фазовой моноимпульсной РЛС / А.В. Челпанов, В.Д. Карлов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС. – 2006. – Вип. 8 (57). – С. 24-27.
6. Челпанов А.В. Готовність радіотехнічних систем з випадковим періодом контролю / А.В. Челпанов, А.Ф. Лазутський // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУ ПС. – 2005. – Вип. 1 (1). – С. 53-57.
7. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
8. Sira S.P. Advances in waveform-agile sensing for tracking / S.P. Sira, A. Papandreou-Suppappola, D. Morrell // Synthesis lectures on algorithms and software in engineering Morgan & Claypool publ. – 2009. – №2. – 83 p.
9. Brookner E. Tracking and Kalman filtering made easy / E. Brookner. – John Wiley & Sons, inc, 1998. – 480 p.

Надійшла до редколегії 12.01.2017

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

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ РЕЖИМАМИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЛС С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

О.А. Абраменко, М.М. Зарицкий, А.В. Челпанов, А.Ф. Шевченко

Рассмотрено содержание основных операций и работа составляющих системы реализующей управление режимом сопровождения целей многофункциональной РЛС с фазированной антенной решеткой. Система предусматривает адаптацию к изменениям потока сопровождаемых целей и параметров их траекторий (при маневре), путем учета приоритета целей и адаптацию к изменениям в точности текущих единичных измерений.

Ключевые слова: многофункциональная РЛС, фазированная антенная решетка, сопровождение целей, адаптация.

THE GUIDANCE SYSTEM OF FUNCTIONAL MODES OF MULTIFUNCTION RADAR BASED ON PHASED ANTENNA ARRAY

O. Abramenko, M. Zaricky, A. Chelpanov, A. Shevchenko

Main features of basic operations and functioning of parts of the device which realize a guidance of targets tracking mode of multifunction radar based on phased antenna array are presented. The device allows to adaptation of changes of maneuvering targets trajectory parameters by the account of targets priority and adaptation of the accuracy of current elementary measuring.

Keywords: multifunction radar, phased array, targets tracking, adaptation.