

А. О. Ковальчук¹, О. Л. Кузнецов¹, О. В. Коломійцев², А. Д. Карлов¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ СТІЙКОСТІ СУПРОВОДЖЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА РАДІАЛЬНОЮ ШВИДКІСТЮ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ПОШИРЕННЯ І ВІДБИТТЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ

Анотація. Супроводження повітряних об'єктів (ПО) здійснюється багатоканальними радіолокаційними станціями та забезпечується підсистемами визначення дальності, радіальної швидкості та кутових координат. За умови, якщо ПО супроводження є високоманевреними, то відбувається суттєве зниження точності і стійкості супроводження відносно ділянки відсутності маневрування, яка буває досить тривалою. У разі виникнення помилкового або застарілого до маневрених характеристик ПО налаштування алгоритмів слідкуючих систем, відбувається суттєве зростання помилки супроводження ПО на ділянці здійснення маневру, що може призвести до зриву супроводження за рахунок значної динамічної складової помилки. Для оцінки стійкості супроводження ПО запропоновано використання еквівалентного розміру апертури дискримінаційної характеристики. Проведено оцінку впливу параметрів стохастичної моделі руху ПО, моделі спостережень та періоду вимірювання координат на стійкість супроводження за радіальною швидкістю. В результаті проведених досліджень з'являється можливість подальшої оцінки доцільності адаптації до маневрених характеристик ПО та надання рекомендацій щодо вибору періоду вимірювання координат в багатоканальних радіолокаторах. Відмічено, що стійкість процесу супроводження ПО залежить від точності поточного вимірювання радіальної швидкості, яка переважно визначається статистичними характеристиками флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу. Вплив даних флуктуацій обумовлено наявністю турбулентних неоднорідностей атмосфери, характером маневру ПО та відбиттям радіохвиль від земної або морської поверхні. Наведено пропозиції щодо врахування вказаних флуктуацій та зменшення їх впливу на якість вирішення завдання супроводження ПО.

Ключові слова: дисперсія помилки екстраполяції, радіальна швидкість, система автоматичного супроводження, слідкувальне вимірювання, статистичні характеристики, супроводження, флуктуації фазового фронту.

Вступ

Стійкість супроводження повітряного об'єкту (ПО) пов'язана із забезпеченням точного прогнозування його положення на наступний крок радіолокаційного спостереження. Здатність аеродинамічних об'єктів (ПО) щодо здійснення маневрування та використання малих і гранично малих висот польоту сприяє суттєвому ускладненню їх супроводження.

Основною характеристикою стійкості супроводження ПО є ймовірність відсутності зриву супроводження протягом певного інтервалу часу. Тому, забезпечення потрібних значень вказаної ймовірності є запорукою стійкості супроводження ПО. Однак, у зв'язку із нелінійними характеристиками дискримінаторів, що визначають граничні умови, є складнощі у отриманні рішення вказаного завдання.

За умови, якщо помилка екстраполяції є порівняною з напівшириною апертури дискримінаційної характеристики (ДХ), то через нелінійність характеристик дискримінаторів щільності розподілів ймовірностей помилок оцінювання й екстраполяції будуть досить помітно відрізнятися від нормальних. Отже, необхідним є проведення досліджень стійкості супроводження ПО. Зазначені обставини дозволяють проводити широкі дослідження впливу структури й параметрів алгоритмів оцінювання та екстраполяції координат ПО на стійкість супроводження в системах, що використовують певний тип дискримінатора, для якого одноразово розраховано еквівалентний розмір апертури ДХ.

Здатність ПО до маневрування, тобто до руху з різним прискоренням обумовлює необхідність поточного оцінювання його радіальної швидкості з максимально

можливою точністю, оскільки це визначає якість виконання основних етапів слідкувального вимірювання.

Якість поточного оцінювання радіальної швидкості ПО, що спостерігається визначається закономірністю фазової структури радіолокаційного сигналу та суттєво залежить від умов його поширення і відбиття, які обумовлюють виникнення флуктуацій фазового фронту хвилі сигналу.

Вказаними умовами можна вважати: атмосферні неоднорідності, здатність ПО до маневрування та вплив підстильної поверхні при спостереженні ПО під малими кутами місця.

Таким чином, доцільним є проведення аналізу стійкості супроводження маневруючих ПО за радіальною швидкістю стосовно частотних дискримінаторів, що використовуються в радіолокаційних станціях (РЛС) сантиметрового діапазону, з наданням пропозицій щодо зниження впливу умов поширення та відбиття радіолокаційного сигналу на точність поточного вимірювання радіальної швидкості ПО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз основних характеристик ПО радіолокаційного спостереження наведено у [1], а питання щодо впливу флуктуацій фазового фронту радіолокаційного сигналу розглядаються у [2-4].

У [5] запропоновано методику визначення фіксованих параметрів алгоритмів супроводження, що забезпечує суттєве підвищення стійкості слідкування стосовно супроводження ПО по дальності. Питання оцінювання стійкості супроводження ПО за допомогою еквівалентного розміру апертури характеристики дискримінатора розглянуто у [6].

Стійкість супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю, безумовно, визначається

точністю поточного вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів, яка використовується у якості зондувального сигналу РЛС для забезпечення вимірювання радіальної швидкості ПО із заданою точністю. Можливого зниженню точності вимірювання частоти Доплера даного радіосигналу та радіальної швидкості ПО спостереження присвячено роботи [7-9].

Вказані у наведених роботах помилки поточного вимірювання частоти Доплера і, як слід, радіальної швидкості ПО, обумовлено флуктуаціями фаз радіоімпульсів прийнятої пачки, які виникають внаслідок впливу реальних умов її поширення та відбиття. Тому, врахування даних флуктуацій на етапі первинної обробки радіолокаційної інформації дозволить у значному ступені покращити подальшу стійкість супроводження маневруючих ПО.

Оптимізацію поточного вимірювання частоти Доплера пачки шляхом врахування статистичних

характеристик фазових флуктуацій її радіоімпульсів достатньо розглянуто у [10, 11].

Результати проведеної оптимізації доцільно врахувати у алгоритмах супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю з метою підвищення їх ефективності.

Метою статті є аналіз можливості підвищення стійкості супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю та надання пропозицій щодо збільшення точності її поточного вимірювання.

Основний матеріал

Для оцінки стійкості супроводження ПО в дискретних радіотехнічних слідкуючих системах високого порядку за ймовірністю потрапляння помилки екстраполяції координати усередину інтервалу $(-L_x/2, L_x/2)$ в [6] запропоновано використовувати еквівалентну кусково-лінійну апроксимацію ДХ (рис. 1).

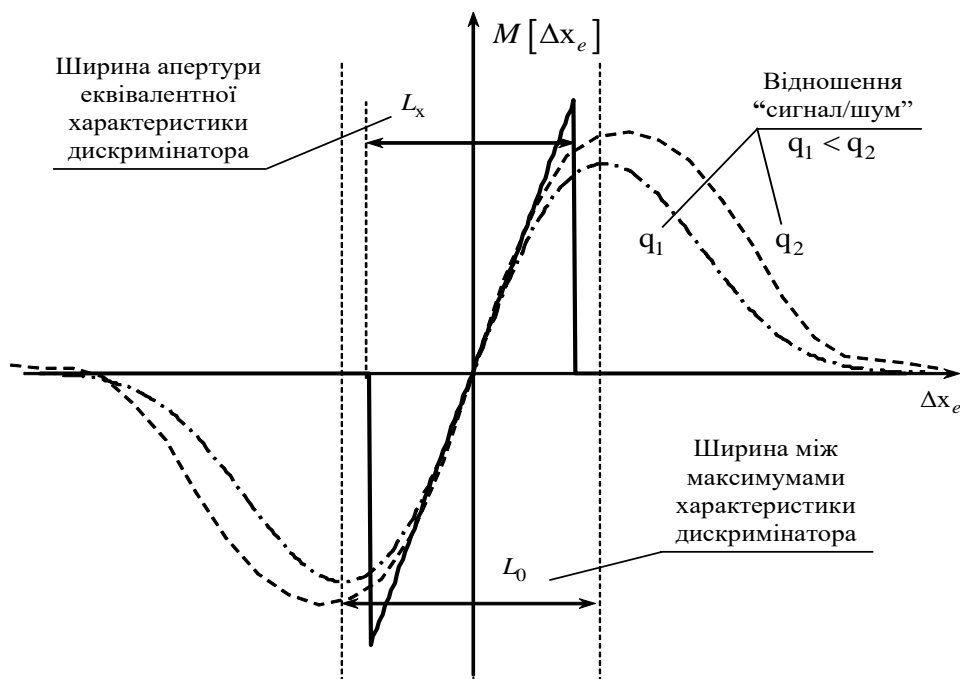


Рис. 1. Дискримінаційна характеристика дискримінатора та її апроксимація: Δx_e – помилка екстраполяції координати; $M[\Delta x_e]$ – математичне сподівання (МО) величини вихідної напруги дискримінатора, Джерело: [6]

Як можна побачити, у лінійних слідкуючих системах помилки супроводження ПО (екстраполяції Δx_e) мають нормальний закон розподілу [6, 12], а ймовірність знаходження помилки екстраполяції в межах інтервалу $(-L_x/2, L_x/2)$ визначається функцією помилок:

$$P_{1x} = 0,5 \left[\operatorname{erf} \left[\frac{0,5L_x + m_e}{\sqrt{2}\sigma_e} \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{0,5L_x - m_e}{\sqrt{2}\sigma_e} \right] \right], \quad (1)$$

де m_e – математичне сподівання (систематична складова); σ_e – середньоквадратичне відхилення помилки екстраполяції координати.

У випадку, якщо алгоритми оцінювання й екстраполяції слідкуючої системи мають структуру

адекватну моделі руху ПО, систематична складова помилки дорівнює нулю і вираз (1) набуває вигляду:

$$P_{1x} = \operatorname{erf} \left[\frac{L_x}{2\sqrt{2}\sigma_e} \right]. \quad (2)$$

У першому наближенні (1) та (2) можна сприймати як вирази для визначення ймовірності відсутності зриву супроводження ПО протягом одного інтервалу $T_n = t_n - t_{n-1}$ між радіоконтактами з ПО. На практиці таке наближення буде давати адекватний результат при $\sigma_e \ll L_x$, тобто, при $P_{1x} \approx 1$.

Умова $P_{1x} < 0,9$ відповідає ситуацій, коли помилка екстраполяції є порівняною з напівшириною апертури. При помітній різниці щільності розпо-

ділів ймовірностей помилок оцінювання й екстраполяції для оцінки ймовірності відсутності зриву супроводження ПО можна використовувати вирази (1) та (2), якщо в них еквівалентний розмір апертури L_x встановлювати з урахуванням відношення “сигнал/шум” q .

При виборі L_x головним критерієм, який гарантує можливість використання виразів (1) та (2) для оцінки ймовірності відсутності зриву автосупроводження ПО, має бути збіг результатів статистичних випробувань стійкості супроводження системи з реальним дискримінатором та аналітичних розрахунків [6].

Подальші дослідження стійкості супроводження ПО здійснюються із використанням визначеної величини L_x та виразів (1) і (2).

Недоліком розглянутої методики є необхідність щодо проведення складного та об'ємного статистичного дослідження. Однак, тільки це може гарантувати достовірність результатів, що даються аналітичними розрахунками ймовірності відсутності зриву супроводження ПО (1) і (2).

Максимальна стійкість супроводження ПО, як можливо побачити з (1) і (2), досягається в системах, оптимальних за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки супроводження.

1. Модель руху маневруючих ПО. Оскільки причиною руху матеріальних ПО є діючі на них сили, основою для побудови моделі руху об'єкта є другий закон Ньютона та рівняння кінематики, які зв'язують між собою вектори прискорення, швидкості і положення ПО.

Модель руху ПО в більшості практичних випадків будують на основі кінематичних рівнянь і статистичної моделі прискорень. Для математичного опису руху сучасних ПО пропонується застосовувати модель руху маневруючих ПО [13], в якій складові вектора прискорення ПО покладаються взаємно незалежними експоненціально корельованими випадковими процесами із багатопіковою щільністю розподілу ймовірностей (рис. 2).

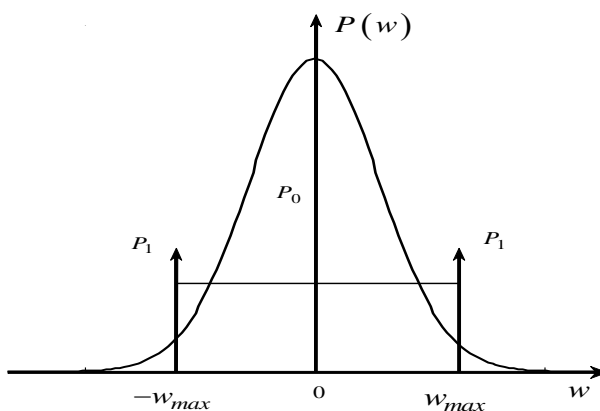


Рис. 2. Багатопікова щільність розподілу ймовірностей Джерело: [13]

Синтез алгоритму оцінювання стану ПО при такій щільності розподілу ймовірностей складових

вектору прискорення не може проводитися у рамках теорії оптимальної лінійної фільтрації, у зв'язку з чим багатопіковий розподіл ймовірностей, який досить адекватно відображає характер зміни прискорення багатьох маневруючих ПО, замінюється еквівалентним нормальним розподілом.

При цьому, МО складових вектору прискорення покладається рівним нулю, а середньоквадратичне відхилення обчислюється наступним чином:

$$\sigma_M = \frac{w_{\max}}{3}(1 + 4P_1 - P_0), \quad (3)$$

де $w_{\max} = n_{\max}g$ – максимальне значення прискорення g , обумовлене маневреними можливостями ПО (максимальними перевантаженнями n_{\max}); P_1 – ймовірність маневру ПО з інтенсивністю $\pm w_{\max}$; P_0 – ймовірність відсутності маневру ПО.

Кореляційна функція величин прискорення ПО при цьому має наступний вигляд:

$$R_M(\tau) = \sigma_M^2 e^{-|\tau|/T_M}, \quad (4)$$

де T_M – стала маневрування ПО, яка є величиною зворотною до частоти маневрування та може становити від одиниць до десятків секунд; σ_M^2 – дисперсія значень прискорення ПО.

Ймовірності P_1 та P_0 визначаються, виходячи з аналізу особливостей застосування ПО й можуть змінюватися у широких межах.

Аналіз рисунку 2 та виразу (3), вказує на те, що величина σ_M залежно від співвідношення між P_1 та P_0 також може змінюватися у досить широких межах.

Використовуючи метод формуючого фільтра, можна записати стохастичне рекурентне матричне рівняння стану [12, 14]:

$$\bar{x}(t_n + T_n) = \Phi(T_n) \bar{x}(t_n) + B \eta(t_n), \quad (5)$$

де $\bar{x}(t_n)$, $\bar{x}(t_n + T_n)$ – поточне та наступне значення координати ПО, відповідно; $\Phi(T_n)$ – перехідна матриця стану за радіальною швидкістю ПО; $B = (0 \ 1)^T$ – матриця збудження за радіальною швидкістю ПО; $\eta(t_n)$ – послідовність шумів збудження з нульовим середнім та дисперсією $v_\eta(T_n)$.

Перехідна матриця стану за радіальною швидкістю ПО та дисперсія шумів збудження визначаються відповідними виразами вигляду:

$$\Phi(T_n) = \begin{pmatrix} 1 & T_n \\ 0 & \rho \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$v_\eta(T_n) = \sigma_M^2(1 - \rho^2), \quad (7)$$

де $\rho = e^{-T_n/T_M}$ – коефіцієнт кореляції значень прискорення на інтервалі спостережень.

2. Модель спостережень. Відомо, що вихідна величина дискримінатора може бути визначеною за

допомогою такого виразу [12, 15, 16]:

$$y(t_n) = F[\Delta x_e(t_n)] + f(t_n), \quad (8)$$

де $F[\Delta x_e(t_n)]$ – МО величини вихідної напруги дискримінатора, обумовлене його ДХ; $f(t_n)$ – дискретна послідовність шумів спостереження відповідної координати з нульовим середнім та дисперсією $v_f(t_n)$, що визначається флуктуаційною характеристикою дискримінатора; $\Delta x_e(t_n) = x(t_n) - x_e(t_n)$ – помилка екстраполяції координати, тобто, величина неузгодженості між дійсним і екстрапольованим значеннями координати ПО.

Зазначені обставини дозволяють для зручності розв'язку задачі оцінки стійкості супроводження повітряного об'єкту використовувати лінеаризовану (еквівалентну) математичну модель дискримінатора (модель спостережень), яка описується таким рівнянням:

$$y(t_n) = \Delta x_e(t_n) + f(t_n). \quad (9)$$

Для рішення задачі визначення ширини апертури еквівалентної характеристики дискримінатора використовувалася нелінійна математична модель дискримінатора, в якій були враховані граничні ефекти, що виникають при виході помилки супроводження ПО за межі лінійної ділянки ДХ.

3. Структура лінійних алгоритмів оцінювання й екстраполяції. Рівняння моделі спостережень (9) можна записати як:

$$y(t_n) = H(\bar{x}(t_n) - \bar{x}_e(t_n)) + f(t_n), \quad (10)$$

де $H = (1 \ 0)$ – матриця спостережень за радіальною швидкістю ПО; $\bar{x}_e(t_n)$ – вектор-стовпець екстрапольованих до поточного вимірювання координат стану ПО.

Алгоритм слідкуючої системи, оптимальної за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки, може бути описаний рекурентними рівняннями оцінювання й екстраполяції [12] такого вигляду:

$$\hat{\bar{x}}(t_n) = \hat{\bar{x}}_e(t_n) + K(t_n) y(t_n), \quad (11)$$

$$\hat{\bar{x}}_e(t_n + T_n) = \Phi(T_n) \hat{\bar{x}}(t_n), \quad (12)$$

де $K(t_n)$ – матриця коефіцієнтів підсилення.

Матриця $K(t_n)$ розраховується з таких рекурентних рівнянь:

$$K(t_n) = V_e(t_n) H^T [H V_e(t_n) H^T + v_f(t_n)]^{-1}; \quad (13)$$

$$V(t_n) = V_e(t_n) - V_e(t_n) H^T \times \\ \times [H V_e(t_n) H^T + v_f(t_n)]^{-1} H V_e(t_n); \quad (14)$$

$$V_e(t_n + T_n) = \Phi(T_n) V(t_n) \Phi^T(T_n) + B v_\eta(T_n) B^T, \quad (15)$$

де V, V_e – матриці других центральних моментів (коваріаційні матриці) помилок оцінювання й екстраполяції стану ПО відповідно.

У алгоритмах (14) та (15) параметрами, які підлягають завданню й визначають якість функціонування системи, є σ_m, T_m та v_f , причому, перші двоє залежать від маневрених властивостей ПО (визначають дисперсію шумів збудження $v_\eta(T_n)$), а третій – від величини відношення “сигнал/шум” та параметрів дискримінатора (визначає дисперсію шумів спостереження $v_f(t_n)$).

В РЛС супроводження ПО використовуються алгоритми з фіксованою матрицею коефіцієнтів підсилення $K(t_n)$. Тому, чим точніше зазначені параметри відповідають реальним характеристикам зовнішніх впливів, тим ближче точність супроводження ПО до потенційно досяжної.

4. Аналіз стійкості супроводження радіотехнічною слідкуючою системою (РТСС) за радіальною швидкістю. Методику, що базується на застосуванні еквівалентного розміру апертури дискримінатора L_x [17, 18], пропонується використати для оцінки ймовірності відсутності зриву супроводження ПО у РТСС за радіальною швидкістю [19].

Структура алгоритмів оцінювання та екстраполяції координат ПО у розглянутих системах задається наведеними вище виразами (11-15). Параметри алгоритмів супроводження вибиралися виходячи з аналізу маневрених можливостей сучасних ПО з урахуванням середньої тривалості маневру та максимальної інтенсивності.

Розрахунки ймовірності відсутності зриву супроводження ПО виконувалися за умовою, що параметри систем супроводження, які обумовлені рівняннями (11-15), вважалися повністю адекватними моделям руху ПО (5) та спостережень (10) [12, 20].

У такому разі, при використанні стохастичної моделі руху (5) та спостережень (10) дисперсії помилок σ_e^2 дорівнюють елементам v_{e11} матриці помилок екстраполяції вектору стану V_e [12].

Для перевірки достовірності аналітичних результатів у ряді контрольних точок ймовірність відсутності зриву супроводження ПО визначалася шляхом проведення прямого статистичного експерименту. У ході прямого експерименту рух ПО задавався безпосередньо стохастичним рівнянням (5), та використовувалися моделі реальних дискримінаторів.

Найбільш повною характеристикою впливу стійкості супроводження ПО на можливості РЛС є ймовірність відсутності зриву супроводження протягом інтервалу часу T_c , що дорівнює середній тривалості супроводження ПО:

$$P_x(T_c) = \prod_{n=1}^{n_c} P_{1x}(T_n), \quad (16)$$

де $P_{1x}(T_n)$ – ймовірність відсутності зриву супроводження ПО за радіальною швидкістю на протяжці

одного інтервалу вимірювання координат; n_c – кількість інтервалів супроводження повітряного об'єкту.
Якщо

$$T_n = \text{const}$$

та

$$P_{1x}(T_n) = P_{1x},$$

розподіл (16) перетвориться до такого найпростішого вигляду:

$$P_x(T_c) = P_{1x}^{T_c/T_n}. \quad (17)$$

Виходячи з (17) проведено розрахунки ймовірності P_{x100} відсутності зриву повітряного об'єкту за 100 с для системи супроводження за радіальною швидкістю, результати яких наведено на рис. 3.

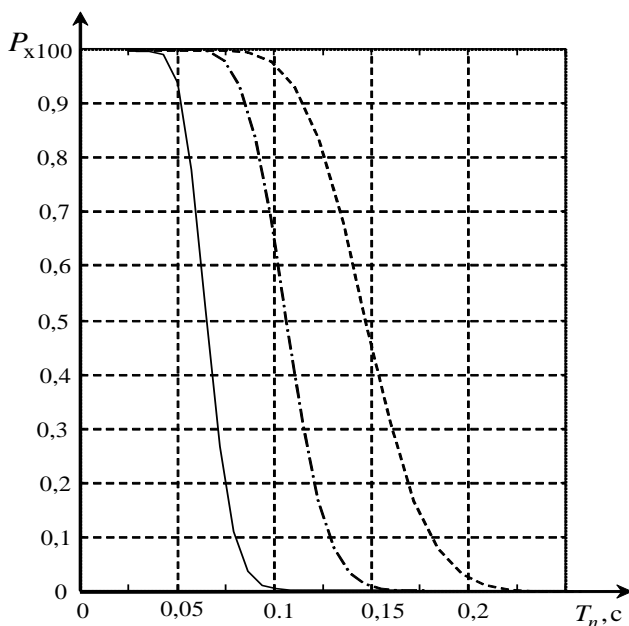


Рис. 3. Залежності ймовірності P_{x100} відсутності зриву супроводження протягом 100 с вимірювання координат від періоду вимірювання T_n (джерело: розроблено авторами)

Суцільною лінією представлено графіки для відношення “сигнал/шум” – 10 дБ, штрих-пунктирною – 14 дБ та пунктирною – 20 дБ.

З наведених графіків можна визначити, що при малих відношеннях “сигнал/шум”, інтервал вимірювання координат повітряного об'єкту не повинен перевищувати 0,03 с.

Отримані результати дозволяють визначити одне із “слабких місць”, яким є система супроводження за радіальною швидкістю повітряного об'єкту [20-22].

Іншою важливою характеристикою стійкості є середній час до зриву супроводження повітряного об'єкту.

У випадку, коли ймовірність відсутності зриву супроводження повітряного об'єкту на інтервалі

$$T_c = n_c T_n$$

задовольняє умові (17), ймовірність першого зриву $Q_x(T_c)$ після T_c секунд супроводження ПО задовольняє геометричному закону розподілу:

$$Q_x(T_c) = (1 - P_{1x}) P_x(T_c), \quad (18)$$

для якого середній час до зриву супроводження ПО визначається наступним виразом:

$$\bar{T}_{cx} = \frac{P_{1x}}{1 - P_{1x}} T_n. \quad (19)$$

Графіки залежності середнього часу до зриву супроводження \bar{T}_{cx} за радіальною швидкістю повітряного об'єкту від періоду вимірювання T_n наведено на рис. 4.

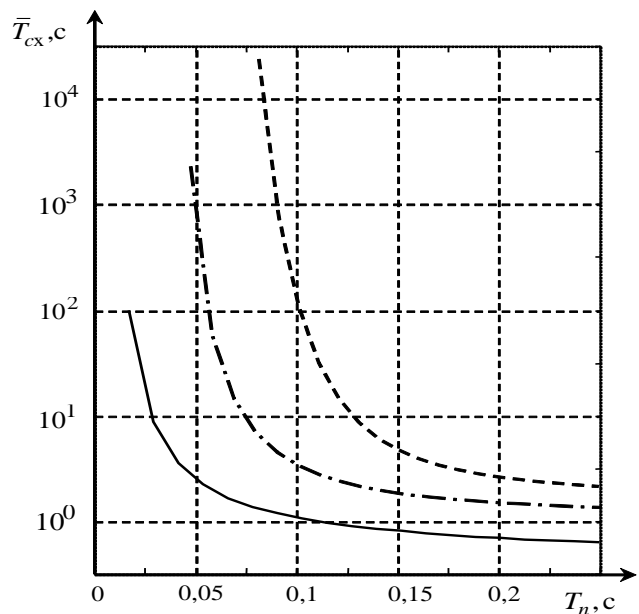


Рис. 4. Залежності середнього часу до зриву супроводження \bar{T}_{cx} за радіальною швидкістю від періоду вимірювання T_n (джерело: розроблено авторами)

З аналізу наведених на рис. 4 графіків можливо заключити, що при малих відношеннях “сигнал/шум” прийнятним є мінімально можливий для багатоканальної РЛС період вимірювання координат, а середній час до зриву супроводження ПО при зростанні періоду вимірювання може становити усього лише одиниці секунд, що є неприпустимим.

Наведені результати отримано для випадку надходження від РЛС потенційних поточних оцінок радіальної швидкості ПО, тобто оцінок, які отримані в результаті часово-частотної обробки радіолокаційного сигналу за наявності лише адитивного впливу внутрішніх шумів приймального пристрою.

5. Пропозиції щодо зниження впливу умов поширення та відбиття радіолокаційного сигналу на точність поточного вимірювання радіальної швидкості ПО. Реальний процес радіолокаційного спостереження аеродинамічних ПО здійснюється в умовах впливу неоднорідностей середовища розповсюдження радіохвиль.

Також слід відзначити, що сучасні ПО здатні виконувати завдання за призначенням на малих та гранично малих висотах з оглядом рельєфу місцевості. При цьому, зростання їхніх маневрених можливостей обумовлює виникнення ефекту блукання радіолокаційного центру повітряного об'єкту, що спостерігається внаслідок швидкої зміни положення його "блискучих точок". Вказане є причиною виникнення флуктуацій фазового фронту хвилі сигналу при відбитті його від маневруючого повітряного об'єкту, що спостерігається під малими кутами місця та обумовлює наявність доплерівського шуму повітряного об'єкту.

Вказане суттєво впливає на якість поточних оцінок радіальної швидкості ПО та, як слід, на стійкість його супроводження.

Як доведено у [7], для сучасних РЛС в умовах регулярного вимірювання, на точність оцінювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів у значно більшому ступені впливають статистичні характеристики флуктуацій фаз її радіоімпульсів ніж відношення "сигнал/шум". При цьому, доведено, що для РЛС з імпульсним зондуванням фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом, а їх кореляція убуває від імпульсу до імпульсу за знакозмінним законом.

Вище викладене підтверджено результатами експериментальних досліджень [23], де у якості радіолокаційного вимірювача було використано розташовану на узбережжі Азовського моря РЛС 35Д6. Отримана кореляційна функція фазових флуктуацій прийнятого сигналу була апроксимована осцилюючою залежністю.

У [7] доведено, що збільшення дисперсії фазових флуктуацій σ_φ^2 на порядок в області малих значень

$$(\sigma_\varphi^2 = 0,01 \dots 0,1 \text{ рад}^2)$$

майже не впливає на зміну величини дисперсії помилки вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів.

Збільшення даної дисперсії на порядок в області суттєвих значень, які можуть мати місце в реальних випадках

$$(\sigma_\varphi^2 = 1 \dots 10 \text{ рад}^2),$$

призводить до зростання дисперсії помилки вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів на порядок і більше.

Для вказаних умов у [8] оцінено можливі значення складових середньоквадратичної помилки (СКП) вимірювання радіальної швидкості ПО, які виникають внаслідок впливу корельованих флуктуацій фази радіолокаційного сигналу, що дозволяє оцінювати ступінь зниження ефективності алгоритмів супроводження та виявлення маневру.

Для РЛС супроводження ПО на дальностях виявлення 50...150 км, неоднорідності тропосфери розміром 100 м здатні викликати флуктуації фази з інтегралом кореляції

$$\tau = 0,1 \dots 1 \text{ с}$$

та дисперсією

$$\sigma_\varphi^2 = 4,8 \dots 9,7 \text{ рад}^2$$

при довжині хвилі РЛС

$$\lambda = 3 \dots 5 \text{ см [8]}.$$

Для наведених даних розраховано складові СКП вимірювання радіальної швидкості ПО, що обумовлені внутрішніми шумами та фазовими флуктуаціями для пачок з різною кількістю радіоімпульсів. Отримані результати свідчать про те, що значення флуктуаційних складових СКП, здатні на порядок і більше перевершувати складові, що обумовлені впливом внутрішніх шумів приймального пристрою РЛС та досягати 3...7 м/с.

Додатковий вплив маневру ПО та відбиття радіохвиль від підстильної поверхні може призвести до суттєвого збільшення даних величин. Відповідне оцінювання стосовно впливу неоднорідностей атмосфери на зниження точності вимірювання частоти Доплера проведено у [9].

При переведенні повітряного об'єкту радіолокаційного спостереження з режиму огляду у режим супроводження, наявність флуктуаційної складової помилки вимірювання його радіальної швидкості може суттєво погіршити якість виконання операцій вторинної обробки радіолокаційної інформації, викликаючи небезпеку зриву ПО з супроводження за радіальною швидкістю.

Тому, для зменшення впливу вказаних факторів пропонується до використання оптимальний алгоритм поточного вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів з врахуванням флуктуацій їх початкових фаз, що має практичну важливість для розв'язання завдання супроводження складних аеродинамічних ПО, що маневрують [10, 11].

При цьому, важливим є застосування вказаної оптимізації для довільного виду кореляційної функції фазових флуктуацій, що обумовлено можливістю зміни параметрів даної кореляційної функції внаслідок відповідної зміни умов радіолокації при польоті аеродинамічних повітряних об'єктів на малих та гранично малих висотах з виконанням маневрування.

За результатами проведеного чисельного оцінювання встановлено, що у звичайних умовах функціонування РЛС підвищення точності вимірювання радіальної швидкості ПО за рахунок врахування фазових флуктуацій у залежності від виду їх кореляційної функції є незначною та може становити 1,1...1,45 разів.

В умовах переважного впливу фазових флуктуацій, тобто внаслідок обуреного стану атмосфери, суттєвого впливу земної (морської) поверхні та виконання повітряним об'єктом складного маневрування, дане підвищення точності може досягати 1,86...6,29 разів [11].

Таким чином вказані пропозиції здатні забезпечити додаткове підвищення стійкості супроводження високоманеврених повітряних об'єктів, але це

потребує отримання достатньо якісних оцінок статистичних характеристик флукуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу.

Висновки

1. Розвиток маневрених можливостей сучасних ПО потребує оцінки спроможностей радіотехнічної слідкуючої системи на предмет стійкості супроводження таких об'єктів. Для оцінки стійкості супроводження повітряного об'єкту можливо застосовувати методику, яка заснована на використанні еквівалентного розміру апертури характеристики дискримінатора.

2. В системі супроводження ПО за радіальною швидкістю при $T_n > 0,1$ с основною складовою помилки екстраполяції є динамічна складова. Період вимірювання координат $T_n = 0,1$ с, що використовується у сучасних РЛС, є завеликим для супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю при малих відношення “сигнал/шум”.

3. При $T_n = 0,1$ с та малих відношеннях “сигнал/шум”, середній час до зриву супроводження повітряного об'єкту за радіальною швидкістю може скласти декілька секунд, тобто є суттєво меншим середнього часу знаходження об'єкта на супроводженні. Тому, при малому відношенні “сигнал/шум” та маневруванні ПО доцільно зменшувати період вимірювання координат до значень

$$T_n \approx 0,01 \dots 0,03 \text{ с}.$$

4. Зменшення динамічної складової помилки супроводження ПО за радіальною швидкістю є можливим шляхом вдосконалення алгоритмів супроводження, використання адаптивних алгоритмів та змінного періоду вимірювання координат.

5. Флукуації фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу, відбитого від маневруючого ПО, в реальних умовах поширення радіохвиль здатні додатково знизити точність поточного вимірювання радіальної швидкості об'єкта і, як слід, зменшити ймовірність відсутності зриву його супроводження. Результати чисельного аналізу свідчать про необхідність пошуку методів зниження впливу флукуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу при вимірюванні радіальної швидкості маневруючого ПО.

6. Підвищення стійкості супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю додатково може бути забезпечено за рахунок врахування випадкових викривлень фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу шляхом проведення статистичної оптимізації його обробки. При цьому, вказана оптимізація дозволяє забезпечити підвищення точності вимірювання радіальної швидкості ПО до декілька разів, але це вимагає оцінювання статистичних характеристик корельованих фазових флукуацій з високою точністю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Довідник учасника АТО: озброєння й військова техніка Збройних Сил Російської Федерації / за ред. А.М. Алімпієва. – Х.: Оригінал, 2015. – 732 с.
2. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. / Под. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с.
3. Карлов В.Д., Кондратенко А.П., Шейгас А.К., Ситник Ю.Б. К вопросу о измерении доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2014. – № 1 (14). – С. 115-117.
4. Петрушенко М.М. Особливості застосування радіотехнічних систем Повітряних Сил в нестабільних гідрометеорологічних умовах та стихійних метеорологічних явищах. *Системи управління навігації та зв'язку*. – 2009. – № 2 (10). – С. 54-57.
5. Карлов В.Д., Ковальчук А.О., Кузнєцов О.Л., Бесова О.В., Струцінський О.В., Ковальчук Ю.О. Методика вибору фіксованих параметрів алгоритмів радіотехнічних слідкуючих систем РЛС. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. – 2022. – Вип. 4(74). – С. 53-58.
6. Хисматулин В.Ш., Ковальчук А.О., Сосунов О.О., Сачук І.І. Оценка устойчивости сопровождения целей с помощью эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора. *Системи обробки інформації*. – 2004. – Вип. 2. – С. 125-132.
7. Карлов В.Д., Кузнєцов О.Л., Артеменко А.М., Карлов А.Д. Зниження точності вимірювання частоти пачки радіоімпульсів внаслідок впливу умов її поширення і відбиття. *Системи управління навігації та зв'язку*. – 2019. – Вип. 4 (56). – С. 130-134.
8. Кузнєцов О.Л., Коломійцев О.В., Кітов В.С., Карлов А.Д. Оцінювання точності поточного вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту в когерентно-імпульсній РЛС супроводження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2020. – Вип. 3(40). – С. 91-99.
9. Kuznietsov O., Karlov V., Karlov A., Kiyko A, Lukashuk O., Biesova O., Petrushenko M. Estimation of the Dispersion of the Error in Measuring the Frequency of a Pack with Correlated Fluctuations in the Initial Phases of its Radio Pulses. *2020. IEEE Ukrainian Microwave Week. On 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. Kharkiv, Ukraine, September 21-25. 2020. Volume 1. P. 174-178.
10. Карлов В.Д., Кузнєцов О.Л., Артеменко А.М. Постановка задачі оптимального оцінювання радіальної швидкості цілі при врахуванні корельованих флукуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. – 2018. – Вип. 3(57). – С. 115-121.
11. Yevseiev S., Kuznietsov O., Herasimov S., Horielyshev S., Karlov A., Kovalov I., Kolomiitsev O., Lukashuk O., Milov O., Panchenko V. Development of an optimization method for measuring the Doppler frequency of a packet taking into account the fluctuations of the initial phases of its radio pulses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 2/9 (110). P. 6-15.
12. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. – М.: Связь, 1976. – 496 с.

13. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью. *Зарубежная радиоэлектроника*, 1971. – №8. – С. 40-57.
14. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. – К.: КВЦ, 2000. – 430 с.
15. Теоретические основы радиолокации. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
16. Бартон Д.К., Вард Г.Р. Справочник по радиолокационным измерениям: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.
17. Хисматулин В.Ш., Сачук И.И., Ковальчук А.А. Оценка вероятности надежного сопровождения аэродинамических целей многоканальной радиолокационной станцией. *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2001. – Вып. 22. – С. 259-262.
18. Хисматулин В.Ш., Зубрицкий Г.М., Ставицкий О.М., Ковальчук А.О. Оценка устойчивости сопровождения по дальности и угловым координатам сверхманевренных летательных аппаратов многоканальной РЛС. *Системы обработки информации*. – 2009. – Вып. 4(78). – С. 130-133.
19. Канащенко А., Корчагин В., Меркулов В., Самарин О. Сверхманевренность и бортовые радиолокационные системы. *Радиотехника*. – 2002. – № 5. – С. 43-50.
20. Kovalchuk A.O., Oleshchuk M. M., Karlov V. D., Karpenko O. V., Besova O. V., Lukashuk O. V. Analysis of sensitivity of target tracking systems to external interference in multichannel radars with fixed parameters. NTU "KHPI". Сучасні інформаційні системи. КН.: NTU "KHPI". 2021. Т. 5. No. 1. pp. 82-86. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.11>
21. Коломійцев О.В., Сачук І.І., Ковальчук А.О. та ін. Канал вимірювання радіальної швидкості літальних апаратів з оптико-електронним модулем для мобільної суміщеної вимірювальної системи G01 S 17/42, G01 S 17/66 // Патент України на корисну модель № 111452 – № u201604967; Заяв. 04.05.2016; Опубл. 10.11.2016; Бюл. № 21. 16 с.
22. Kuznietsov O., Kovalchuk V., Karlov D., Kovalchuk A., Vasylyshyn V., Yarovy S. Providing the Required Accuracy of Measurements of Spatial Coordinates of Aerial Objects // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. On 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). Kharkiv, 2020. V. 2. P. 226-229.
23. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
24. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
25. Худов В.Г. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // Системи обробки інформації, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77-80.
26. Ткачов В. М., Коваленко А. А., Кучук Г. А., Ні Я. С. Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 2. С. 159-165. DOI: <https://10.20998/2522-9052.2021.2.22>
27. Карлов В.Д., Родюков А.О., Пічугін І.М. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. Вип. 4 (21). С. 71-74.
28. Karlov Volodymyr Можливості врахування впливу тропосфери при вимірюванні кутових координат та висоти аеродинамічного об'єкта / Volodymyr Karlov, Oleksandr Kuznietsov, Oleksii Kolomiitsev, Igor Krasnoshapka, Ivan Petrushenko, Oleh Strutsynskiy // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 3 (69). – С. 121-127. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.121>
29. Кузнєцов, О., Коломійцев, О., Яровий, С., Олійник, Р., & Живець, Ю. (2021). Підвищення точності вимірювання кутових координат повітряних об'єктів при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу. *Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, (9), 65-72. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.9.2021.09>.

Received (Надійшла) 25.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.09.2023

Providing the specified resistance of tracking of aerial objects by radial velocity in real conditions of radiolocation signal propagation and reflection

Andrii Kovalchuk, Oleksandr Kuznietsov, Oleksii Kolomiitsev, Anton Karlov

Abstract. Tracking of aerial objects is carried out by multi-channel radar stations and is provided by subsystems for determining range, radial velocity and angular coordinates. If the tracking objects are highly maneuverable, then there is a significant decrease in the accuracy and stability of the tracking relative to the area of lack of maneuvering, which is quite long. In the event of erroneous or outdated parameters of the tracking system's algorithms, there is a significant increase in the error of tracking the aircraft in the area of the maneuver, which can lead to the breakdown of tracking due to a significant dynamic component error. In order to assess the stability of tracking, it is proposed to use the equivalent size of the aperture of the discriminating characteristic. The influence of the parameters of the stochastic model of the aircraft movement, the observation model and the period of coordinate measurement on the stability of tracking according to the radial velocity was evaluated. As a result of the conducted research, it becomes possible to further evaluate the feasibility of adaptation to the maneuverability characteristics of aerial objects and provide recommendations regarding the selection of the coordinate measurement period in multi-channel radars. It is noted that the stability of the tracking process depends on the accuracy of the current measurement of the radial velocity of the object, which is mainly determined by the statistical characteristics of the fluctuations of the phase front of the radar signal wave. The influence of these fluctuations is due to the presence of turbulent inhomogeneities of the atmosphere, the nature of the object's maneuver and the reflection of radio waves from the earth's or sea's surface. Proposals are given to take into account the specified fluctuations and reduce their impact on the quality of solving the task of tracking air objects. Increasing the stability of tracking highly maneuverable air objects at radial speed can additionally be ensured by taking into account random distortions of the radar signal wave phase front by performing statistical optimization of its processing.

Keywords: extrapolation error variance, radial velocity, automatic tracking system, follow-up measurement, statistical characteristics, tracking, phase front fluctuations.