

Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.391.26

DOI: 10.30748/nitps.2020.40.10

О.Л. Кузнєцов¹, О.В. Коломійцев², В.С. Кітов¹, А.Д. Карлов¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

² Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ПОТОЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОБ’ЄКТУ В КОГЕРЕНТНО-ІМПУЛЬСНІЙ РЛС СУПРОВОДЖЕННЯ

У статті оцінюються можливі значення середньоквадратичної похибки поточного вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об’єкту, які виникають за рахунок впливу реальних умов поширення і відбиття радіолокаційного сигналу. В якості носія радіолокаційної інформації розглядається пачка, яка частково втратила когерентність внаслідок наявності у її радіоімпульсах корельованих флуктуацій початкових фаз. Вважається, що фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом з нульовим середнім, а кореляція фазових флуктуацій із збільшенням інтервалу між радіоімпульсами пачки убуває за знакозмінним законом. Проведено оцінювання радіальної швидкості об’єкту радіолокаційного спостереження за байєсівським підходом. Отримані результати свідчать про те, що для сучасних радіолокаційних систем (РЛС) супроводження, точність поточного вимірювання радіальної швидкості об’єкту переважно визначається статистичними характеристиками флуктуації фаз радіолокаційного сигналу. Вплив даних флуктуацій, що обумовлений наявністю турбулентних неоднорідностей атмосфери, характером руху об’єкта та відбиттям радіохвиль від земної або морської поверхні може призводити до суттєвого зниження якості слідкувального вимірювання. Наведені результати оцінювання можуть бути в подальшому використані для дослідження умов, за якими відбувається зрив аеродинамічних об’єктів з супроводження когерентно-імпульсними РЛС.

Ключові слова: радіальна швидкість аеродинамічного об’єкту, слідкувальне вимірювання, пачка радіоімпульсів, фазові флуктуації, когерентно-імпульсна радіолокаційна станція.

Вступ

Постановка проблеми. Стійкість супроводження повітряного об’єкту пов’язана з прогнозуванням його можливого положення на наступний крок радіолокаційного спостереження, тобто з адекватністю обраної моделі його руху. Можливість аеродинамічних об’єктів здійснювати політ на малих і гранично малих висотах суттєво ускладнює їх супроводження та якість вторинної обробки радіолокаційної інформації.

Здатність аеродинамічного об’єкту до маневрування, тобто до руху з різним прискоренням обумовлює необхідність оцінювання сучасними радіолокаторами супроводження похідної дальності з максимально можливою точністю.

Поточне вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об’єкту протягом первинної часочастотної обробки радіолокаційного сигналу обумовлює якість виконання основних етапів слідкувального вимірювання, таких як: екстраполяція, стробування, селекція відміток у стробі та фільтрація па-

раметрів траєкторії.

Вказане обумовлює використання в сучасних РЛС супроводження когерентної пачки радіоімпульсів, що забезпечує необхідну міру роздільної здатності за радіальною швидкістю аеродинамічного об’єкту та точність вимірювання його радіальної швидкості.

Однак, реальні умови поширення та відбиття радіолокаційного сигналу здатні суттєво обмежити його часову когерентність та знизити точність поточного вимірювання координат та параметрів руху об’єкту радіолокаційного спостереження.

Ступінь когерентності пачки радіоімпульсів, тобто закономірність її фазової структури, суттєво залежить від умов її поширення та відбиття. Такими умовами можна вважати наступні:

- наявність турбулентних атмосферних неоднорідностей [1–3];
- складність конфігурації повітряного об’єкту [4–6];
- інтерференцію прямої та відбитої від земної або морської поверхні радіохвиль [7–9].

В сучасних когерентно-імпульсних РЛС, які здійснюють супроводження повітряних об'єктів, що маневрують, на етапі первинної обробки радіолокаційної інформації реалізовані алгоритми когерентного накопичення прийнятих пачок радіоімпульсів.

Таким чином, важливим з практичної точки зору завданням є оцінювання середньоквадратичних похибок поточного вимірювання радіальної швидкості аеродинамічних (повітряних) об'єктів в умовах флуктуацій фаз радіоімпульсів прийнятої пачки, що виникають внаслідок впливу реальних умов її поширення і відбиття.

Оцінка точності поточного вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту за рахунок фазових флуктуацій сигналу дозволить оцінити ступінь погіршення якості етапів вторинної обробки радіолокаційної інформації, що забезпечують супроводження об'єкту.

Аналіз останніх досліджень публікацій. При реалізації радіолокаційного спостереження флуктуації фазової структури радіолокаційного сигналу мають різну природу походження. Вплив неодорідностей атмосфери на виникнення даних флуктуацій та аналіз їх статистичних характеристик розглянуто в [1; 7; 10–12].

Блукання радіолокаційного центру об'єкту зі складною формою й великою кількістю блискучих точок та виникнення внаслідок цього доплерівського шуму описано в [1; 4–5; 13–14].

Особливостям інтерференції прямої та відбитої від границі розділу середовищ радіохвиль внаслідок радіолокаційного спостереження маловисотних об'єктів присвячені роботи [4; 7–8; 15–16].

За наявності у радіоімпульсах прийнятої пачки флуктуацій початкових фаз у [17–18] розглядається методика розрахунку середньоквадратичної похибки вимірювання її частоти. За допомогою вказаної методики в [19–20] розраховані можливі значення похибок вимірювання радіальної швидкості об'єкту, що викликані впливом неодорідностей тропосфери та іоносфери Землі для РЛС оглядового типу різних діапазонів довжин хвиль. Статистичні характеристики фазових флуктуацій та питання вибору параметрів радіолокаційних сигналів розглянуті в [21–23].

Метою статті є оцінювання точності поточного вимірювання радіальної швидкості аеродинамічних об'єктів в умовах впливу фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки в РЛС, що здійснюють вторинну обробку радіолокаційної інформації.

Виклад основного матеріалу

Однією з найважливіших складових процесу слідкувального вимірювання є процедура поточного вимірювання (оцінювання) параметрів сигналу. Поточна оцінка може бути проведена одночасно з ви-

явленням. Однак, надалі вважається, що сигнал виявлений за прийнятою реалізацією $y(t)$, до якої входить корисний сигнал $x(t, \alpha)$ з параметром α та внутрішній гаусівський шум $n(t)$:

$$y(t) = x(t, \alpha) + n(t). \quad (1)$$

Відповідно до байєсівської теорії оцінювання параметр α вважається випадковою величиною із заданою густиною ймовірності $p(\alpha)$. Ця густина ймовірності є додослідною (апостеріорною).

При точковій оцінці випадкова структура прийнятої реалізації, що обумовлена наявністю завад і флуктуацій корисного сигналу, призводить до відмінності оцінки α від істинного значення. У цьому випадку похибка є випадковою величиною.

З математичної статистики відомо, що після отримання реалізації $y(t)$ всі відомості про параметр α містяться в післядослідній (апостеріорній) густині ймовірності:

$$p(\alpha / y) = p_y(\alpha),$$

яка є умовною ймовірністю розподілу параметра α при фіксованому значенні $y(t)$.

Оптимальна оцінка [1] знаходиться як аргумент максимуму післядослідної густини ймовірності:

$$\hat{\alpha} = \arg \max p_y(\alpha). \quad (2)$$

Оптимальну оцінку можна отримати не тільки по максимуму післядослідної густини ймовірності, але і будь якої іншої функції, що пов'язана з $p_y(\alpha)$ монотонною залежністю. Частіше переходять до натурального логарифму післядослідної густини ймовірності:

$$\hat{\alpha} = \arg \max \ln p_y(\alpha). \quad (3)$$

Якщо апостеріорний розподіл достатньо “широкий” ($p(\alpha) \approx \text{const}$), то післядослідна густина ймовірності $p_y(\alpha)$ практично збігається з відношенням правдоподібності $l(\alpha)$. Оптимальна оцінка, в такому випадку, може бути знайдена за максимумом натурального логарифму відношення правдоподібності:

$$\hat{\alpha} = \arg \max \ln l(\alpha). \quad (4)$$

Таким чином, при “поганих” апостеріорних даних оптимальна оцінка частоти Допплера F_D збігається з поточною, яка відповідає максимуму відношення правдоподібності (або функції, що пов'язана з ним монотонною залежністю).

Інформативним параметром, який необхідно оцінити, є циклічний доплерівський зсув частоти $\alpha = \Omega = 2\pi F_D$, який пов'язаний із радіальною швидкістю аеродинамічного об'єкту виразом [1–2]:

$$V_r = \frac{\lambda}{4\pi} \Omega, \quad (5)$$

де λ – довжина хвилі радіолокаційного сигналу.

Згідно (4) для визначення Ω в апіорно великому діапазоні необхідно розв'язати рівняння:

$$\hat{\Omega} = \arg \max \ln l(\Omega). \quad (6)$$

Відношення правдоподібності для когерентного сигналу з рівномірно розподіленою випадковою фазою й випадковою амплітудою, розподіленою за законом Релея [1], має вигляд:

$$l(\Omega) = \frac{1}{1 + \frac{q^2}{2}} \exp \frac{\frac{q^2}{2}}{2 \left(1 + \frac{q^2}{2}\right)} |Z_H(\Omega)|^2, \quad (7)$$

де q^2 – відношення сигнал-шум за потужністю; $|Z_H(\Omega)|^2$ – квадрат модулю нормованого комплексного вагового інтеграла, як функція вимірюваного параметра.

В умовах регулярного вимірювання ($q^2 \gg 1$) справедливою є рівність:

$$|Z_H(\Omega)| = |Z_H(\bar{\Phi}_c, \bar{\Phi}_0)| \approx q\rho(\bar{\Phi}_c, \bar{\Phi}_0) = q\rho(\Omega), \quad (8)$$

де $\bar{\Phi}_c = \|\Phi_{ci}\|^T$, ($i=1, 2, \dots, n$) – вектор спостережуваних значень початкових фаз радіоімпульсів пачки; $\bar{\Phi}_0 = \|\Phi_{0i}\|^T$ – вектор очікуваних значень початкових фаз радіоімпульсів пачки; $\rho(\bar{\Phi}_c, \bar{\Phi}_0) = \rho(\Omega)$ – нормована функція розузгодження за початковою фазою спостережуваного та очікуваного радіосигналу.

З урахуванням (8) відношення правдоподібності (7), при $q^2 \gg 1$, можливо записати, як:

$$l(\Omega) \approx \frac{2}{q^2} \exp \frac{q^2 \rho^2(\Omega)}{2}. \quad (9)$$

Корисним сигналом є когерентна пачка радіоімпульсів з випадковою амплітудою і початковою фазою, комплексна амплітуда якої описується наступним виразом:

$$\dot{X}(t, \Omega) = b \sum_{i=1}^n \dot{X}_i(t, \Omega) \exp[j(\beta)], \quad (10)$$

де $\dot{X}_i(t, \Omega)$ – комплексна амплітуда i -го радіоімпульсу; b – випадкова амплітуда радіосигналу, що розподілена за законом Релея; β – випадкова початкова фаза радіосигналу, що розподілена за рівномірним законом; i – номер радіоімпульсу, який відлічується від початку пачки; n – число радіоімпульсів в пачці.

Для симетричного амплітудного розподілу радіоімпульсів в пачці у [17] отримана достатня статистика, яка є натуральним логарифмом відношення правдоподібності (9):

$$S(\Omega) = \ln l(\Omega) = -\frac{q^2}{2} \left\{ \frac{T^2}{2} \Omega^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i-j)^2 - T \Omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j (i-j) (\Phi_i - \Phi_j) \right\}, \quad (11)$$

де $\Omega = \omega - \omega_0$ – розузгодження між спостережуваною ω й очікуваною ω_0 циклічними частотами пачки радіоімпульсів; i, j – номери радіоімпульсів, що відлічуються від початку пачки; Φ_i, Φ_j – спостережувані значення початкової фази i -го та j -го радіоімпульсів відповідно; $\xi_i = \frac{Z_i}{Z_\Sigma}$;

$$Z_i = \frac{1}{2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{Y}_i(t) \dot{X}_i^*(t) dt \right|$$

– модуль сигнальної частини комплексного кореляційного інтеграла для i -го радіоімпульсу; $\dot{Y}_i(t)$ – комплексна обвідна прийнятого i -го радіоімпульсу; $\dot{X}_i^*(t)$ – комплексно спряжена обвідна опорної напруги при обробці i -го радіоімпульсу; $Z_\Sigma = \sum_{i=1}^n Z_i$; T – період слідування радіоімпульсів пачки.

Дисперсія похибки оцінювання параметра Ω отримується згідно методу найбільшої правдоподібності [1] за наступним виразом:

$$\frac{1}{\sigma_\Omega^2} = -\frac{d^2 \ln l(\Omega)}{d\Omega^2} = -\frac{d^2 S(\Omega)}{d\Omega^2} \quad \text{при} \quad \Omega = \hat{\Omega}, \quad (12)$$

де $\hat{\Omega}$ – оцінка частоти пачки радіоімпульсів.

Після дворазового диференціювання за вимірюваним параметром достатньої статистики (11), отримується дисперсія похибки оцінювання частоти пачки радіоімпульсів з прямокутною обвідною ($\xi_i = 1/n$) та парною кількістю радіоімпульсів у наступному вигляді:

$$\sigma_\Omega^2 = \frac{12}{q^2 (4m^2 - 1) T^2}, \quad (13)$$

де m – число пар радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки.

Дисперсія загальної похибки вимірювання частоти пачки радіоімпульсів визначається сумою дисперсії σ_Ω^2 похибки (13), що обумовлена впливом внутрішніх шумів приймального пристрою та дисперсії $\sigma_{\Omega_{\phi l}}^2$ похибки, що викликана фазовими флуктуаціями радіоімпульсів пачки:

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma_\Omega^2 + \sigma_{\Omega_{\phi l}}^2. \quad (14)$$

Вважається, що фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом з нульовим середнім, а кореляція фазових

флуктуацій сусідніх радіоімпульсів пачки убуває за знакозмінним законом [1–2; 21].

Для фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки з осцилюючою кореляційною функцією [21], дисперсія похибки вимірювання параметра Ω за наявності лише фазових флуктуацій оцінюється згідно виразу, що отриманий в [17]:

$$\sigma_{\Omega\phi l}^2 = \frac{18\sigma_{\phi}^2}{m^2(4m^2-1)T^2} \times \left[\sum_{j=1}^m (2j-1)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}(2j-1)\right) \cos((2j-1)\gamma T)\right) + 2 \times \sum_{l=1}^{m-j} \exp\left(-\frac{T}{\tau}l\right) \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1)(2j+2l-1) \times \left(\cos(j\gamma T) - \exp\left(-\frac{T}{\tau}(2j-1)\right) \cos((2j+l-1)\gamma T) \right) \right], \quad (15)$$

де σ_{ϕ}^2 – дисперсія фазових флуктуацій; τ – інтервал кореляції фазових флуктуацій; γ – частота осциляцій коефіцієнта кореляції фази.

Складові середньоквадратичної похибки (СКП) поточного вимірювання радіальної швидкості об’єкту, що обумовлені внутрішніми шумами приймального пристрою та фазовими флуктуаціями радіоімпульсів прийнятої пачки, можуть бути розраховані згідно відповідних виразів:

$$\sigma_{v_{ш}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sigma_{\Omega}, \quad (16)$$

$$\sigma_{v_{\phi l}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sigma_{\Omega\phi l}. \quad (17)$$

Має практичну користь отримати можливі значення складових СКП поточного вимірювання радіальної швидкості об’єкту при відношенні сигнал/шум за потужністю $q^2 = 1000$, для випадків когерентного накопичення короткої $n = 8$, середньої $n = 16$ та тривалої $n = 32$ пачок радіоімпульсів.

При поширенні радіохвиль у випадково-неоднорідному середовищі, в [1–2] надані величини дисперсії фазових флуктуацій радіосигналу σ_{ϕ}^2 , який пройшов крізь обурену тропосферу Землі. Інтервал кореляції фазових флуктуацій може складати $\tau = 0,1 \dots 1$ с.

Для РЛС супроводження на дальностях виявлення об’єкту 50...150 км, неоднорідності тропосфери розміром 100 м здатні викликати флуктуації фази з дисперсією $\sigma_{\phi}^2 = 4,8 \dots 9,7 \text{ рад}^2$ при $\lambda = 3 \dots 5$ см.

Для наведених даних, за допомогою виразів (16) та (17) можливо розрахувати складові СКП поточного вимірювання радіальної швидкості об’єкту,

що обумовлені внутрішніми шумами та фазовими флуктуаціями радіоімпульсів прийнятої пачки відповідно для $n = 8, 16$ та 32. Результати даних розрахунків для РЛС супроводження наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Складові СКП вимірювання радіальної швидкості об’єкту для РЛС супроводження, м/с

n	σ_v	$\sigma_{v\phi l}$
8	0,66	1,85...6,9
16	0,33	1,3...4,82
32	0,16	0,91...3,4

Отримані результати свідчать про те, що значення складових СКП поточного вимірювання радіальної швидкості об’єкту, обумовлені фазовими флуктуаціями радіоімпульсів прийнятої пачки, здатні в декілька разів перевершувати складові, що обумовлені впливом внутрішніх шумів приймального пристрою РЛС.

Окрім впливу неоднорідностей тропосфери, вплив доплерівського шуму об’єкту та багатотрасовості поширення радіосигналу обумовлює додаткове збільшення флуктуаційної складової СКП поточного вимірювання радіальної швидкості об’єкту до декілька одиниць м/с і більше.

На етапі первинної обробки радіолокаційної інформації отримують оцінки параметрів сигналу в деякий фіксований момент часу. На етапі вторинної обробки радіолокаційної інформації забезпечується формування траєкторної інформації про аеродинамічний об’єкт, як об’єкт локації.

Слідкувальні системи сучасних РЛС будують на основі теорії калманівської фільтрації, згідно з якою результуюча оцінка формується за результатами поточного і попередніх вимірювань. Для побудови алгоритмів і пристроїв слідкувального вимірювання необхідно задати модель зміни параметрів траєкторії руху об’єктів, що представляють собою гіпотези про характер зміни параметрів траєкторії за час вимірювання [1].

При переведенні РЛС з режиму огляду на режим супроводження наявність флуктуаційної складової похибки вимірювання радіальної швидкості об’єкту здатна суттєво погіршити якість виконання операцій вторинної обробки радіолокаційної інформації.

Якщо об’єкт наближається до РЛС з постійною радіальною швидкістю, в імпульсній РЛС супроводження у дискретні моменти t_k відбувається вимірювання дальності r_k і радіальної швидкості $V_k = const$, що і утворює вектор стану:

$$\vec{W}_k = \|r_k \quad V_k\|^T.$$

За відсутності фазових флуктуацій прийнятого

сигналу характер змін параметрів можна задати у вигляді векторно-матричного рівняння:

$$\bar{W}_{k+1} = \begin{vmatrix} r_k - V_k \Delta t_k \\ V_k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -\Delta t_k \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_k \\ V_k \end{vmatrix}. \quad (18)$$

Залежності r_k і V_k від k (моменту t_k) представлені на рис. 1 при початковій дальності r_0 .

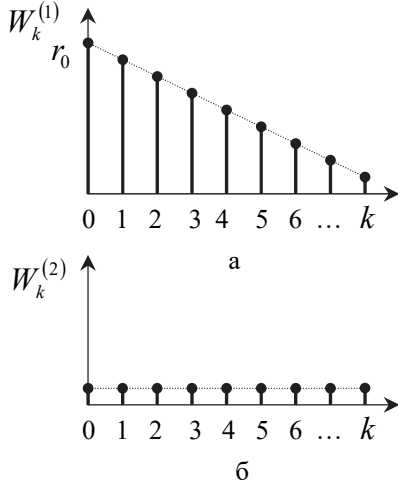


Рис. 1. Складові вектора стану при детермінованому русі аеродинамічного об'єкта

Припустимо, що за наявності фазових флуктуацій радіальна швидкість V_k набуває випадкових змін δ_k , тобто вектор спостереження (вектор оцінок поточного вимірювання) має вигляд:

$$\bar{\alpha}_{k+1} = \begin{vmatrix} 1 & -\Delta t_k \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_k \\ V_k \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ \delta_k \end{vmatrix}, \quad (19)$$

та має як регулярну (перший доданок), так і випадкову (другий доданок) складові (рис. 2).

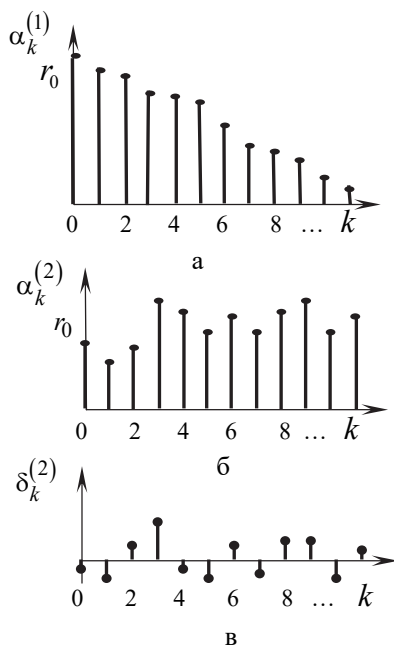


Рис. 2. Складові вектора спостереження

Таким чином, реальні умови поширення і відбиття радіолокаційного сигналу обумовлюють виникнення суттєвих похибок вимірювання радіальної швидкості аеродинамічних об'єктів радіолокаційного спостереження. Вказані похибки призводять до значних відхилень спостережуваних значень координат та параметрів руху аеродинамічних об'єктів від значень, що визначаються обраними моделями їх зміни. Даний факт безпосередньо впливає на якість калманівської фільтрації в процесі слідкувального вимірювання.

Додатково слід зазначити, що реальні траєкторії не належать до класу детермінованих функцій внаслідок маневрених можливостей аеродинамічних об'єктів.

На етапі захвату траєкторії на супроводження доцільно використовувати порівняно прості моделі руху об'єктів. Після виявлення маневру вимоги до якості супроводження підвищуються, що вимагає використання при супроводженні моделей, які найбільше відповідають характеру руху об'єкту, що маневрує. Вказане потребує додаткового врахування флуктуацій радіальної швидкості об'єктів внаслідок маневру поряд із флуктаціями, що обумовлені впливом реальних умов поширення й відбиття радіохвиль. Для побудови слідкувальних вимірювачів необхідно визначити модель зміни вектора стану (модель руху), яка має враховувати як детермінований рух об'єкту, так й випадковий. При суттєвому впливі умов поширення радіохвиль необхідно забезпечувати додаткове коригування обраної моделі з врахуванням статичних характеристик фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятого пачкового радіосигналу.

Отже, точність вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкта визначає адекватність обраної моделі траєкторії його реальному руху як для випадку відсутності, так й для випадку наявності маневру. Тобто, точність вимірювання радіальної швидкості об'єкта на етапі первинної обробки радіолокаційної інформації суттєво визначає якість її вторинної обробки.

Висновки

Таким чином, супроводження аеродинамічних об'єктів в реальних умовах сучасними когерентно-імпульсними РЛС пов'язано з флуктуаціями початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки. Дані флуктуації обумовлюють суттєві похибки поточного вимірювання радіальної швидкості об'єкту радіолокаційного спостереження. Вказане вимагає спільного врахування як фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу так й маневру аеродинамічного об'єкту при слідкувальному вимірюванні його координат й параметрів руху.

Список літератури

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Под. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. “МАКВИС”, 1998. – 828 с.
2. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Сов. радио, 1970. – 383 с.
3. Влияние среды распространения радиоволн на приморском направлении при измерении угловых координат радиолокационных целей / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, В.В. Челпанов, К.П. Квиткин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – № 3 (25). – С. 51-53.
4. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1976. – Т. 1. – 456 с.
5. Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
6. Обнаружение аэродинамических целей в условиях шумовых и пассивных помех с широким доплеровским спектром / В.Д. Карлов, И.Г. Леонов, А.Е. Присяжный, О.Я. Луковский // Системи обробки інформації. – 2006. – № 9(58). – С. 34-36.
7. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 223 с.
8. Котов А.Ф. Влияние отражений от подстилающей поверхности на процесс локации объектов / А.Ф. Котов // Теория и практика систем синхронизации. – М.: Московский институт радиотехники электроники и автоматики. – 1992. – С. 4-8.
9. Влияние неоднородностей рельефа позиции радиолокационной станции на эффективность подавления внешней помехи при локации надводных целей / В.Д. Карлов, Н.Н. Минервин, Н.Н. Петрушенко, Е.В. Лукашук // Системи управління навігації та зв'язку. – 2008. – № 4(8). – С. 34-36.
10. Петрушенко М.М. Особливості застосування радіотехнічних систем Повітряних Сил в нестабільних гідрометеорологічних умовах та стихійних метеорологічних явищах / М.М. Петрушенко // Системи управління навігації та зв'язку. – 2009. – № 2(10). – С. 54-57.
11. Влияние флуктуаций фронта помеховой волны на эффективность её подавления корреляционным компенсатором в радиотехнических системах приморского базирования / В.Д. Карлов, Н.Н. Минервин, Н.Н. Петрушенко, Е.В. Лукашук, О.Я. Луковский // Системи обробки інформації. – 2008. – № 7(74). – С. 87-93.
12. До питання про вимірювання дальності маловисотної цілі при її радіолокації в межах тропосферного хвилеводу над морем / В.Д. Карлов, Д.Б. Кучер, О.В. Струцинський, О.В. Лукашук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 3(24). – С. 98-101.
13. К вопросу о измерении доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем / В.Д. Карлов, А.П. Кондратенко, А.К. Шейгас, Ю.Б. Ситник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 115-117.
14. Особливості вимірювання радіальної складової швидкості цілі, лоцюємої під малими кутами місця над морем / В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, Г.В. Певцов, А.І. Нос // Новітні технології-для захисту повітряного простору: зб. тез доповідей Восьмої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 18-19 квітня 2012 р. – 2012. – С. 295.
15. Карлов В.Д. Использование фазометрического метода при оптимизации измерения радиальной составляющей скорости цели, лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, А.И. Нос // Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: зб. тез доповідей Дванадцяті науково-технічної конференції. 6-7 вересня 2012 р. – 2012. – С. 198.
16. Карлов В.Д. Использование фазометрического метода при оптимизации измерения радиальной составляющей ускорения цели над морем / В.Д. Карлов, Н.Н. Петрушенко, А.И. Нос // Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: зб. тез доповідей Дванадцяті науково-технічної конференції. 6-7 вересня 2012 р. – 2012. – С. 210.
17. Минервин Н.Н. Ошибки измерения радиальной скорости и радиального ускорения цели, обусловленные неучетом флуктуаций фаз импульсов пачки / Н.Н. Минервин, А.Л. Кузнецов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2001. – № 22. – С. 288-294.
18. Про вплив механізму розповсюдження радіохвиль на локацію цілей в тропосферному радіохвилеводі над морем / В.Д. Карлов, О.В. Бесова, М.М. Олещук, М.М. Петрушенко // Новітні технології-для захисту повітряного простору: зб. тез доповідей Десятої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 9-10 квітня 2014 р. – 2014. – С. 254.
19. Мінервін М.М. Ограничение точности измерения радиальной скорости цели за счет условий распространения, отражения и обработки радиолокационного сигнала / М.М. Мінервін, О.Л. Кузнецов, В.А. Таршин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2006. – № 3(9). – С. 116-118.
20. Результаты экспериментальных исследований особенностей локації маловисотних цілей, що здійснюють політ над морською поверхнею / В.Д. Карлов, М.М. Олещук, Г.В. Певцов, В.Л. Місайлов // Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем IPST: матеріали третьої міжнародної НТК НТУ ХПІ 2014 р. – 2014. – С. 35.
21. Карлов В.Д. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах

аномальної рефракції / В.Д. Карлов, А.О. Родюков, І.М. Пічугін // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 4(21). – С. 71-74.

22. Кузнецов О.Л. Розрізнення за шляховою дальністю РЛС з синтезованою антеною решіткою в умовах впливу неоднорідностей атмосфери / О.Л. Кузнецов, О.В. Коломійцев, К.В. Садовий // Збірник наукових праць ХНУПС. – 2017. – № 2(51). – С. 130-133.

23. Алешин Г.В. Оптимальный выбор параметров радиолокационных сигналов по условному критерию максимума экономической эффективности / Г.В. Алешин, А.В. Коломийцев // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 6. – С. 3-7.

References

1. Shirman, Ya.D. (1999), "Radioelektronnye sistemy" [Radio electronic systems], Z.A.O. MAKVIS, Moscow, 828 p.
2. Shifrin, Ya.S. (1970), "Voprosy statisticheskoy teorii anten" [Statistical antenna theory issues], Sov. radio, Moscow, 383 p.
3. Karlov, V.D., Petrushenko, N.N., Chelpanov, V.V. and Kvitkin, K.P. (2010), "Vliyanie srede rasprostrantniya radiovoln na primorskom napravlenii pri izmerenii uglovykh koordinat radiolokatsionnykh tseley" [The influence of the propagation medium of radio waves in the coastal direction in measuring the angular coordinates of the radar targets], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 3 (25), pp. 51-53.
4. Skolnik, M. (1976), "Spravochnik po radiolokatsii" [Radar Reference Guide], Sov. radio, Moscow, 456 p.
5. Ostrovityanov, R.V. and Basalov, F.A. (1982), "Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhonnykh tseley" [The statistical theory of radar extended targets], Radio and communication, Moscow, 232 p.
6. Karlov, V.D., Leonov, I.G., Prisyazhny, A.E. and Lukovskiy, O.Ya. (2006), "Obnaruzhenie aerodinamicheskikh tseley v usloviyakh shumovykh i passivnykh pomekh s shirokim doplerovskim spektrom" [Detection of aerodynamic targets in the conditions of noise and passive interference with a wide Doppler spectrum], *Information Processing Systems*, No. 9(58), pp. 34-36.
7. Krasnyuk, N.P. (1988), "Vliyanie troposfery i podstilayushchey poverkhnosti na robotu RLS" [The influence of the troposphere and underlying surface on the radar's work], Radio and communication, Moscow, 223 p.
8. Kotov, A.F. (1992), "Vliyanie otrazheniy od podstilayushchey poverkhnosti na protsess lokatsii obiyektov" [Influence of reflections from a laying surface on the process of location objects], *Theory and practice of synchronization systems*, Moscow, pp. 4-8.
9. Karlov, V.D., Minervin, N.N., Petrushenko, N.N. and Lukashuk, E.V. (2008), "Vliyanie neodnorodnostey reliefa pozitsii radiolokatsionnoy stantsii na effektivnost podavleniya vneshney pomekhi pri lokatsii nadvodnykh tseley" [Influence of inhomogeneities of radar station's position on the effectiveness of suppressing external interference when locating of the overwater targets], *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 4(8), pp. 34-36.
10. Petrushenko, M.M. (2009), "Osoblyvosti zastosuvannya radiotekhnichnykh system Povitryanykh Syl v nestabilnykh gidrometeorologichnykh umovakh ta stykhiynukh meteorologichnykh yavyschchakh" [Features of the use of radio systems of the Air Force in unstable hydrometeorological conditions and natural meteorological phenomena], *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 2(10), pp. 54-57.
11. Karlov, V.D., Minervin, N.N., Petrushenko, N.N., Lukashuk, E.V. and Lukovskiy, O.Ya. (2008), "Vliyanie fluktuatsiy fronta pomekhovoy volny na effektivnost yeyo podavleniya korrelyatsionnym kompensatorom v radiotekhnicheskikh sistemakh primorskogo bazirovaniya" [Influence of fluctuations of the noise wave front on the efficiency of its suppression by the correlation compensator in radio-technical systems of coastal basing], *Information Processing Systems*, No. 7(74), pp. 87-93.
12. Karlov, V.D., Kucher, D.B., Strutsinskiy, O.V. and Lukashuk, O.V. (2016), "Do pytannya pro vymiryuvannya dalnosti malovysoynoyi tsili pry yiyi radiolokatsiyi v mezhakh troposfernogo khvylevodu nad morem" [On the issue of measuring the range of low-altitude target during its radiolocation within the tropospheric waveguide over the sea], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 3(24), pp. 98-101.
13. Karlov, V.D., Kondratenko, A.P., Sheygas, A.K. and Sytnyk, Yu.B. (2014), "K voprosu o izmerenii doplerovskoy chastyoty signala otrazhennogo ot tseli lotsiruemoi za predelami radiogorizonta nad morem" [On the question of measuring the Doppler frequency of a signal is reflected from a target is located outside the horizon above the sea], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(14), pp. 115-117.
14. Karlov, V.D., Petrushenko, M.M., Pevtsov, G.V. and Nos, A.I. (2012), "Osoblyvosti vymiryuvannya radialnoyi skladovoyi shvydkosti tsili, lotsyuemoi pid malymy kutamy mistysya nad morem" [Features of the measurement of the radial component of the target velocity, which is located at small angles of the place above the sea], *8th Scientific Conference of Ivan Kozhedub Kharkiv Air Force University: New technologies – for air space protection*, April 18-19, Kharkiv, pp. 295.
15. Karlov, V.D., Petrushenko, N.N. and Nos, A.I. (2012), "Ispolzovanie fazometricheskogo metoda pri optimizatsii izmereniya radialnoy sostavlyayushchey skorosti tseli, lotsyuemoi za predelami radiogorizonta nad morem" [Using the phase method for optimizing the measurement of the radial component of the target velocity is located outside the radio horizon above the sea], *12th Scientific Conference: The creation and modernization of weapons and military equipment in modern condition*, September 6-7, Theodosius, pp. 198.
16. Karlov, V.D., Petrushenko, N.N. and Nos, A.I. (2012), "Ispolzovanie fazometricheskogo metoda pri optimizatsii izmereniya radialnoy sostavlyayushchey uskoreniya tseli nad morem" [Using the phase method for optimizing the measurement of the radial component of the target acceleration above the sea], *12th Scientific Conference: The creation and modernization of weapons and military equipment in modern condition*, September 6-7, Theodosius, pp. 210.
17. Minervin, N.N. and Kuznetsov, A.L. (2001), "Oshibki izmereniya radialnoy skorosti i radialnogo uskoreniya tseli,

obyslovlennye neuchyotom flyuktuatsiy faz impulsiv pachki” [Errors of measurement of radial velocity and radial acceleration of the target, due to the neglect of fluctuations of the phases of the burst pulses], *Aerospace and Technology*, No. 22, pp. 288-294.

18. Karlov, V.D., Besova, O.V., Oleshchuk, M.M. and Petrusenko, M.M. (2014), “Pro vplyv mekhanizmu rozpovsyudzhennya radiokhvyl na lokatsiyu tsiley v troposfernomu radiokhvylevodi nad morem” [About the influence of the propagation mechanism of radio waves on the location of targets in a tropospheric radio waveguide above the sea], *10th Scientific Conference of Ivan Kozhedub Kharkiv Air Force University: New technologies – for air space protection*, April 9-10, Kharkiv, pp. 254.

19. Minervin, M.M., Kuznietsov, O.L. and Tarshin, V.A. (2006), “Ogranichenie tochnosti izmereniya radialnoy skorosti tseli za schet usloviy rasprostraneniya, otrazheniya i obrabotki radiolokatsionnogo signala” [Limit the accuracy of measuring the radial velocity of the target due to the conditions of propagation, reflection and processing of the radar signal], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 3(9), pp. 116-118.

20. Karlov, V.D., Oleshchuk, M.M., Pevtsov, G.V. and Misaylov, V.L. (2014), “Resultaty eksperimentalnykh doslidzhen osoblyvostey lokatsiyi malovysotnykh tsiley, shcho zdiysnyuyut polit nad morskoyu poverkhneyu” [The results of experimental studies of the locations of low-altitude targets that fly over the sea surface], *3th International STC NTU KhPI: Information problems of the theory of acoustic radio electronic and telecommunication systems IPST*, Kharkiv, pp. 35.

21. Karlov, V.D., Rodyukov, A.O. and Pichugin, I.M. (2015), “Statystychni kharakterystyky radiolokatsiynykh sygnaliv vidbytykh vid mistsevykh predmetiv v umovakh anomalnoyi refraktsiyi” [Statistical characteristics of radar signals are reflected from local objects in conditions of abnormal refraction], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 4(21), pp. 71-74.

22. Kuznietsov, O.L., Kolomiitsev, O.V. and Sadovyi, K.V. (2017), “Rozrinnennja za shljahovoy dalnisty RLS z sintezovanoj anteny reshitoj v umovah vplyvu neodnorodnostei atmosferi” [Distinction after way distance RLS with the synthesized aerial by a grate in the conditions of influence of not homogeneity atmosphere], *Scientific works of Kharkiv National Air Force University*, No. 2(51), pp. 130-133.

23. Aloshin, G.V. and Kolomiitsev, A.V. (2015), “Optimalnii vibor parametrov radiolokacionih signalov po uslovnomu kriteriyu maksimuma ekonomicheskoi efektyvnosti” [Optimal choice of parameters of radio-location signals on the conditional criterion of a maximum of economic efficiency], *The Informatively-managing systems are on a railway transport*, No. 6, pp. 3-7.

Надійшла до редколегії 23.04.2020

Схвалена до друку 09.06.2020

Відомості про авторів:

Кузнєцов Олександр Леонідович

кандидат технічних наук доцент професор кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5915-8107>

Коломійцев Олексій Володимирович

доктор технічних наук старший науковий співробітник професор кафедри Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8228-8404>

Кітов Вадим Станіславович

старший викладач Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4328-2840>

Карлов Антон Дмитрович

начальник групи міжнародного військового співробітництва Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0812-7052>

Information about the authors:

Oleksandr Kuznietsov

Candidate of Technical Sciences Associate Professor Professor of the Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5915-8107>

Oleksii Kolomiitsev

Doctor of Technical Sciences Senior Research Professor of the Department of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8228-8404>

Vadim Kitov

Senior Instructor of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4328-2840>

Anton Karlov

Head of International Military Cooperation Group of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0812-7052>

ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТЕКУЩЕГО ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В КОГЕРЕНТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РЛС СОПРОВОЖДЕНИЯ

А.Л. Кузнецов, А.В. Коломийцев, В.С. Китов, А.Д. Карлов

В статье оцениваются возможные значения среднеквадратической ошибки текущего измерения радиальной скорости аэродинамического объекта, которые возникают за счет влияния реальных условий распространения и отражения радиолокационного сигнала. В качестве носителя радиолокационной информации рассматривается пачка радиоимпульсов, которая частично утратила когерентность вследствие наличия в ее радиоимпульсах коррелированных флуктуаций начальных фаз. Предполагается, что фазовые флуктуации радиоимпульсов принятой пачки распределены по нормальному закону с нулевым средним, а корреляция фазовых флуктуаций с увеличением интервала между радиоимпульсами пачки убывает по знакопеременному закону. Проведена оценка радиальной скорости аэродинамического объекта, как объекта радиолокационного наблюдения, с использованием байесовского подхода. Полученные результаты оценки свидетельствуют о том, что для современных радиолокационных станций сопровождения, точность текущего измерения радиальной скорости аэродинамического объекта преимущественно определяется статистическими характеристиками флуктуаций фаз радиолокационного сигнала. Влияние данных флуктуаций, обусловленное наличием турбулентных неоднородностей атмосферы, характером движения объекта и отражением радиоволн от земной или морской поверхностей, может приводить к существенному снижению качества слеящего измерения радиолокационной станции. Флуктуации обуславливают существенные погрешности текущего измерения радиальной скорости объекта радиолокационного наблюдения. Все это требует общего учета как фазовых флуктуаций радиолокационного сигнала, так и маневра аэродинамического объекта при слеящем измерении его координат и параметров движения. Точность измерения радиальной скорости объекта на этапе первичной обработки радиолокационной информации существенно определяет качество ее вторичной обработки. Полученные результаты оценивания радиальной скорости аэродинамического объекта в дальнейшем могут быть использованы для исследования условий, при которых происходит срыв объектов с сопровождения когерентно-импульсными радиолокационными станциями.

Ключевые слова: радиальная скорость аэродинамического объекта, слеящее измерение, пачка радиоимпульсов, фазовые флуктуации, когерентно-импульсная радиолокационная станция.

ASSESSING THE ACCURACY OF THE CURRENT MEASUREMENT OF THE RADIAL VELOCITY OF AN AERODYNAMIC OBJECT IN A COHERENT-PULSE TRACKING RADAR

O. Kuznietsov, O. Kolomiitsev, V. Kitov, A. Karlov

The article estimates the possible values of the components of the mean-square error of measuring the radial velocity of the aerodynamic object which appear as a result of fluctuations of the phase of the radio signal. The signals at the input of the radar's receiver is an additive mixture of signals reflected from the objects, and uncorrelated Gaussian noise, that is the assumption of investigating. Consideration is carried out for a model of a signal with a random amplitude and an initial phase. It is assumed that phase fluctuations are distributed according to the normal law with zero mean, and their correlation decreases with an increase in the interval between the radio bursts of the packet alternatingly. The frequency of radio signal is estimated by the maximum criterion of the natural logarithm of the likelihood ratio. The accuracy of the measurement of the burst frequency is evaluated for case of coordinated processing without taking into account the phase fluctuations. The results show that due to the phase fluctuations of the radio pulses of the received pack, the mean-square measuring error of the aerodynamic object radial velocity can exceed the values determined by the requirements for coherent-pulse tracking radars. The performed numerical analysis allows to determine the degree of reduction of the quality of the radio pulses burst time-frequency processing in coherent-pulse tracking radars and evaluates the degree of reduction of the effectiveness of the further secondary processing of the radar information. Taking into account the fluctuations of the initial phases of the radio pulses of the received bursts during the measurement of the aerodynamic object radial velocity makes it possible to improve characteristics of efficiency for tracking radar operating with complex, less visible and maneuvering aerodynamic objects. Fluctuations stipulate the substantial errors of the current measuring of radial speed of object of radio-location supervision. All of it requires the general account of both phase fluctuations of radio-location signal and manœuvre of aerodynamic object at the tracker measuring of his coordinates and parameters of motion. It is also provided the possibility of optimizing the time-frequency processing of radar signals in coherent-pulse tracking radars.

Keywords: radial velocity of aerodynamic objects, tracking measurement, burst of radio pulses, phase fluctuations, coherent-pulse radar.