

УДК 621.391.26

О.Л. Кузнєцов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАЗОВИХ ФЛУКТУАЦІЙ СИГНАЛУ НА ЗНИЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВИХ КООРДИНАТ ЦІЛІ В РЛС З ФАЗОВАНИМИ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ

Синтезовано алгоритм вимірювання кутової координати цілі при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу, а також отримано формули, які визначають потенційну точність вимірювання. Для різних законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій сигналу, що приймається елементами антенної решітки, запропонована методика оцінювання помилки вимірювання кута його приходу.

*кутова координата цілі, фазова флуктуація, РЛС, фазована антенна решітка*

### Вступ

**Постановка проблеми.** В теперішній час розробляються, модернізуються і широко використовуються РЛС з фазованими антенними решітками (ФАР). Фазові зсуви прийнятих сигналів в елементах ФАР несуть інформацію про положення цілі у просторі.

Реальні умови поширення і відбиття радіолокаційного сигналу є джерелом виникнення фазових флуктуацій в елементах приймальної антени, що знижує точність вимірювання координат цілі. Аналіз зниження точності вимірювання координат цілі РЛС з ФАР внаслідок умов її функціонування є практично корисним для визначення ступеня їх впливу на якість вирішення РЛС задач за призначенням.

**Аналіз результатів останніх досліджень і публікацій.** В ряді робіт розглядаються питання, що пов'язані з аналізом роботи РЛС в умовах флуктуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу.

Так в роботі [1] проведено аналіз зниження точності вимірювання доплерівського зсуву частоти прийнятої пачки за рахунок фазових флуктуацій її радіоімпульсів. В роботі [2] синтезовано алгоритм вимірювання кута приходу сигналу з врахуванням його фазових флуктуацій. Представляє практичну користь проведення аналізу впливу фазових флуктуацій прийнятого сигналу на якість просторової обробки в РЛС з ФАР, що дозволить визначити межі застосування розробленого у [2] оптимального алгоритму.

**Мета статті** – розробка методики оцінювання впливу флуктуацій фазового фронту хвилі на зниження точності вимірювання кутових координат цілі при багатоканальному прийомі відбитого від неї сигналу і різних законах зміни коефіцієнта міжелементної кореляції фази.

### Результати досліджень

При прийомі когерентного сигналу з випадковою рівномірно розподіленою початковою фазою і випадковою, розподіленою за законом Релея амплітудою на фоні некорельованого шуму відношення правдоподібності визначається виразом [3]:

$$\ell = \frac{1}{1+q^2/2} \exp \frac{q^2/4}{(1+q^2/2)} |Z_n|^2, \quad (1)$$

де  $q^2$  – відношення сигнал/шум по потужності;  $|Z_n|^2$  – квадрат модульного значення нормованого комплексного вагового інтегралу.

В умовах регулярного вимірювання ( $q^2 \gg 1$ ) справедливим є співвідношення

$$|Z_n| \approx q \rho, \quad (2)$$

де  $\rho$  – нормована функція розузгодженості (автокореляційна функція) по фазі спостережуваного і очікуваного сигналів.

В цьому випадку вираз (1) можна перетворити до наступного вигляду

$$\ell \cong \left(2/q^2\right) \cdot \exp\left(q^2 \rho^2 / 2\right). \quad (3)$$

Для лінійної антенної решітки (АР):

$$\rho^2 = \left| \sum_{i=1}^n \xi_i \exp \left[ j \left( \Phi_i + \phi_i + \frac{(2i-1-n) 2\pi d}{\lambda} \sin \theta \right) \right] \right|^2, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість елементів АР;  $i$  – номер елемента, що відрховується від початку АР;  $\xi_i = Z_i / Z_\Sigma$ ;

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

– модуль комплексного кореляційного інтегралу для  $i$ -го елемента АР;  $Y_i(t)$  – комплексна амплітуда прийнятого сигналу в  $i$ -му елементі АР;  $\dot{X}_i^*(t)$  – комплексно спряжена амплітуда опорної напруги при обробці сигналу в  $i$ -му елементі АР;  $Z_\Sigma = \sum_{i=1}^n Z_i$ ;  $\Phi_i$  – спостережуване значення початкової фази сигналу в  $i$ -му каналі АР;

$\phi_i$  – випадкова (флукутаційна) складова фази сигналу в  $i$ -му каналі АР;  $\left(\frac{2i-1-n}{2}\right)\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta$  – регулярна складова зсуву фази в  $i$ -му каналі АР;  $\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta$  – різниця фаз сигналів в сусідніх елементах АР;  $\theta$  – очікуваний кут приходу сигналу, що відраховується від нормалі до апертури АР;  $\lambda$  – довжина хвилі РЛС;  $d$  – відстань між сусідніми елементами АР.

Для малого розузгодження спостережуваних і очікуваних значень різниць фаз у симетричних каналах АР вираз (4) перетворимо до вигляду

$$\rho^2 = 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \xi_i \xi_k (\Phi_i - \Phi_k)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \xi_i \xi_k (i-k)^2 + \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \times \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \xi_i \xi_k (i-k)(\Phi_i - \Phi_k), \quad (5)$$

де  $k$  – номер каналу АР.

Підставляючи (5) у вираз (3), логарифмуючи і залишаючи тільки залежні від вимірюваного параметру складові, одержуємо вираз для достатньої статистики

$$S(\theta) = -\frac{q^2}{2} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \xi_i \xi_k (i-k)^2 - \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \xi_i \xi_k (i-k)(\Phi_i - \Phi_k) \right]. \quad (6)$$

Оцінка кутової координати і дисперсія помилки цієї оцінки знаходиться за методом найбільшої правдоподібності [3]:

$$\frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta} = 0 \text{ при } \theta = \hat{\theta}; \quad (7) \quad \sigma_{\hat{\theta}}^2 = 1/|S''_{\theta}(0)|. \quad (8)$$

Після однократного і двократного диференціювання по вимірюваному параметру виразу (6) одержимо оцінку і дисперсію помилки оцінки кутової координати  $\theta$  для АР з рівномірним амплітудним розподілом ( $\xi_i = 1/n$ ):

$$\hat{\theta} = \arcsin \left[ \frac{3\lambda}{m(4m^2-1)2\pi d} \sum_{j=1}^m (2j-1)\Delta\Phi_j \right], \quad (9)$$

$$\frac{1}{\sigma_{\hat{\theta}}^2} = \frac{q^2(4m^2-1)}{12} \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \right)^2, \quad (10)$$

де  $j$  – номер пари каналів АР, симетричних відносно її центру;  $m = n/2$  – число пар симетричних каналів (відлік пар ведеться від центру АР);  $\Delta\Phi_j$  – різниця початкових фаз сигналів  $j$ -ої симетричної пари каналів АР.

Випадкова складова помилки вимірювання кута приходу, що обумовлена флукутаціями фаз сиг-

налів в каналах АР, може бути представлена таким чином:

$$\Delta\theta = \frac{3\lambda}{m(4m^2-1)2\pi d} \sum_{j=1}^m (2j-1)\Delta\phi_j, \quad (11)$$

де  $\Delta\phi_j$  – флукутаційна складова різниці фаз сигналів  $j$ -ї симетричної пари каналів АР.

Дисперсія флукутаційної складової помилки вимірювання кута приходу сигналу визначається виразом

$$\sigma_{\Delta\theta}^2 = \frac{9\lambda^2}{(m2\pi d)^2(4m^2-1)^2} \left\langle \left[ \sum_{j=1}^m (2j-1)\Delta\phi_j \right]^2 \right\rangle, \quad (12)$$

де  $\langle \rangle$  – операція статистичного усереднювання.

Передбачається, що фазові флукутації розподілені за нормальним законом з нульовим середнім і дисперсією  $\sigma_{\phi}^2$ . Коефіцієнт міжканальної кореляції фазових флукутацій сигналів може бути описаний такими залежностями, що широко використовуються на практиці:

$$K(d) = e^{-d/r}, \quad (13)$$

$$K(d) = e^{-d/r} \cos(\gamma d), \quad (14)$$

де  $r$  – радіус кореляції флукутацій фази сигналу;  $\gamma$  – параметр осциляцій коефіцієнта кореляції фази.

Дисперсія загальної помилки  $\sigma_{\theta_3}^2$  вимірювання кута приходу сигналу визначається сумою дисперсії складової помилки  $\sigma_{\theta_{ш}}^2$ , що викликана внутрішніми шумами приймального пристрою, і дисперсії складової помилки  $\sigma_{\theta_{фл}}^2$ , що викликана фазовими флукутаціями сигналу в приймальних елементах АР:

$$\sigma_{\theta_3}^2 = \sigma_{\theta_{ш}}^2 + \sigma_{\theta_{фл}}^2. \quad (15)$$

Оцінку внеску флукутацій початкових фаз сигналу в каналах АР зручно здійснити за допомогою відношення

$$\sigma_{\theta_3}^2 / \sigma_{\theta_{ш}}^2 = 1 + \sigma_{\theta_{фл}}^2 / \sigma_{\theta_{ш}}^2. \quad (16)$$

Вирази для дисперсії флукутаційної складової помилки вимірювання кута приходу сигналу можуть бути отримані шляхом проведення операції статистичного усереднювання для АР з різною кількістю елементів. Дисперсія відповідної шумової складової  $\sigma_{\theta_{ш}}^2$  визначається виразом (10).

Якщо коефіцієнт міжканальної кореляції фазових флукутацій сигналу описується експоненційною залежністю (13), вираз для відносної дисперсії помилки вимірювання кута його приходу має вигляд

$$\sigma_{\theta_3}^2 / \sigma_{\theta_{ш}}^2 = 1 + 3q^2 \sigma_{\phi}^2 \left/ \left( 2m^2(4m^2-1) \right) \times \left[ \sum_{j=1}^m (2j-1)^2 \left( 1 - \exp\left( -\frac{d}{r}(2j-1) \right) \right) + \right. \quad (17)$$

$$+2 \sum_{l=1}^{m-j} \exp\left(-\frac{d}{r}\right) \times \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1) \times (2j+2l-1) \times \\ \times (1 - \exp(-(d/r)(2j-1)))$$

Для фазових флуктуацій з коефіцієнтом кореляції (14) відносна дисперсія помилки визначається наступним виразом

$$\sigma_{\theta_3}^2 / \sigma_{\theta_{ш}}^2 = 1 + \frac{3q^2 \sigma_\phi^2}{2m^2 (4m^2 - 1)} \left[ \sum_{j=1}^m (2j-1)^2 (1 - \exp(-\frac{d}{r}(2j-1)) \cos((2j-1)\gamma d)) + 2 \times \right. \\ \left. \times \sum_{l=1}^{m-j} \exp(-\frac{d}{r}l) \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1)(2j+2l-1) \times \right. \\ \left. \times (\cos(j\gamma d) - \exp(-\frac{d}{r}(2j-1)) \cos((2j+1-1)\gamma d)) \right]. \quad (18)$$

Вирази (17) і (18) дозволяють чисельно оцінити вплив фазових флуктуацій сигналу на зниження точності вимірювання кутових координат цілі в РЛС з ФАР при експоненційному і знакозмінному законах зміни коефіцієнта кореляції фази.

### Висновки

Відсутність врахування фазових флуктуацій сигналу при його просторовій обробці може бути прич-

ною виникнення помилок вимірювання кутових координат цілі в РЛС з ФАР. Отримані результати можуть бути практично використані при оцінюванні впливу реальних умов поширення і відбиття радіолокаційного сигналу на зниження бойових можливостей РЛС з ФАР.

### Список літератури

1. Минервин Н.Н., Кузнецов А.Л. Ошибки измерения радиальной скорости и радиального ускорения цели, обусловленные неучетом флуктуаций фаз импульсов пачки // *Авиационно-космична техніка і технологія*. – Х.: ХАІ, 2001. – Вип. 22. – С. 288-294.

2. Минервин Н.Н., Васюта К.С. Оптимальное оценивание угла прихода волны при наличии случайных искажений ее фронта и аддитивных помех // *Радиотехника*. – Х.: ХТУРЭ, 1998. – Вып. 105. – С. 61-68.

3. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Под. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с.

Надійшла до редколегії 10.01.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.М. Мінервін, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.