

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]:

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

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 ρ – 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; $Z_\Sigma = \sum_{i=1}^n Z_i$; Φ_i – спостережуване значення початкової фази сигналу в i -му каналі АР;

ϕ_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; θ – очікуваний кут приходу сигналу, що відраховується від нормалі до апертури АР; λ – 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]:

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

Після однократного і двократного диференціювання по вимірюваному параметру виразу (6) одержимо оцінку і дисперсію помилки оцінки кутової координати θ 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 σ_{ϕ}^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; γ – 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

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

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 учетом флюктуаций 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.