

УДК 621.391.26

О.Л. Кузнецов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ В РЛС З ФАЗОВАНОЮ АНТЕННОЮ РЕШІТКОЮ

У статті проводиться чисельний аналіз можливостей підвищення точності вимірювання кутових координат цілі при оптимізації просторової обробки радіолокаційного сигналу в РЛС з фазованою антенною решіткою. Отримані результати дозволяють оцінити можливості вдосконалення фазового методу вимірювання кутових координат цілі.

**Ключові слова:** фазована антенна решітка, кутова координатна, радіолокаційний сигнал, фазовий метод.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Підвищення інформаційних можливостей РЛС оглядового типу на сучасному етапі розвитку радіолокаційної техніки пов'язано із застосуванням фазованих антенних решіток (ФАР), що дозволяє забезпечити визначення просторового положення повітряних цілей з подальшою трасовою обробкою [1]. Для вимірювання кутових координат цілей в даних РЛС широко використовується фазовий метод, згідно якому інформація про просторове положення цілі визначається за допомогою фазових зсувів прийнятих сигналів в елементах ФАР [1, 2].

Поширення і відбиття радіолокаційного сигналу в реальних умовах є причиною виникнення флуктуацій фаз сигналів в приймальних елементах ФАР, які є джерелом випадкових складових помилок вимірювання кутових координат цілей. Цей ефект обумовлений наявністю у атмосфері шарових та турбулентних неоднорідностей, формою і конфігурацією цілі, а також можливістю відбиття сигналу від заважаючих об'єктів.

Оскільки флуктуації фаз прийнятих сигналів призводять до порушення їх просторової когерентності, то їх врахування при просторовій обробці в РЛС з ФАР дозволяє підвищити точність визначення кутових координат цілей.

**Аналіз результатів останніх досліджень і публікацій.** Оцінка можливого зниження точності вимірювання кутових координат цілей, внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та земної поверхні була проведена в роботі [3].

Питання врахування фазових флуктуацій при вимірюванні кутових координат цілей в РЛС з ФАР при аналоговій та цифровій обробці радіолокаційного сигналу розглядалися в роботах [4] і [5].

Таким чином, виникає необхідність визначення ступені доцільності врахування даних флуктуацій

при реалізації фазового методу вимірювання кутових координат цілі в РЛС оглядового типу з ФАР.

**Метою статті** є оцінювання ефективності оптимізації просторової обробки радіолокаційного сигналу в оглядових РЛС з ФАР.

### Основний матеріал

Фазовий метод вимірювання кутових координат полягає у визначенні напрямку надходження фронту електромагнітної хвилі (ЕМХ) відносно початкового (опорного) напрямку. Інформація про кутову координату міститься в різниці фаз коливань сусідніх каналів (елементів) прийому.

При просторовій обробці радіолокаційного сигналу на фоні лише внутрішнього шуму, який для корисного сигналу є адитивною завадою, кутова координата цілі  $\theta_{\text{ц}}$  відносно рівнофазного напрямку (РФН) визначається згідно виразу

$$\theta_{\text{ц}} = \arcsin \frac{\psi_0 \lambda}{2\pi d}, \quad (1)$$

де  $\psi_0$  – набіг фаз між сусідніми каналами прийому;  $d$  – відстань між сусідніми каналами прийому;  $\lambda$  – довжина хвилі РЛС.

При наявності поряд з внутрішнім шумом корельованих фазових флуктуацій, які для корисного сигналу є мультиплікативною завадою, алгоритм оптимального оцінювання кута приходу хвилі [4] описується виразом

$$\theta_{\text{ц}} = \arcsin \frac{\lambda}{2\pi d} \sum_{k=1}^m g_k \Delta\Phi_k, \quad (2)$$

де  $\Delta\Phi_k = \Phi_{m+1-k} - \Phi_{m+k}$  – значення різниці фаз сигналів  $k$ -ої симетричної пари каналів антенної решітки, яка відраховується від 1 у центрі до  $m$  на її краях;  $m$  – число пар симетричних каналів ФАР (відлік пар ведеться від центру ФАР);  $g_k$  – вагові коефіцієнти, які враховують сумісний вплив фазових

флуктуацій і адитивних шумових коливань.

В РЛС з цифровою антенною решіткою (ЦАР) здійснюється дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) оцифрованих сигналів і формування таким чином діаграми спрямованості (ДС) антени на прийом.

Для оптимального оцінювання кутової координати цілі з урахуванням фазових флуктуацій сигналу і адитивних шумових коливань, і-му каналу ЦАР повинна відповідати виконувана процесором ДПФ операція [5]:

$$\dot{Y}_\Sigma(u_i) = \sum_{k=0}^{M-1} \zeta_k y_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{M} k \cdot u_i\right\}, \quad (3)$$

де  $u_i = -M\psi_i/2\pi$ ;  $\psi_i$  – різниця фаз коливань  $y_k$  і  $y_{k+1}$  каналів ЦАР, що відповідає вимірюваному напрямку  $\theta_i$ ;  $M$  – кількість каналів ЦАР.

Алгоритм ДПФ згідно (3) підлягає модифікації, яка полягає у введенні в нього спеціальних вагових коефіцієнтів  $\zeta_k$ .

Вагові коефіцієнти  $\zeta_k$  можуть бути пов'язані з ваговими коефіцієнтами  $g_k$  наступним чином:

$$\frac{\zeta_k}{\zeta_1} = \frac{1}{(2k-1)^2} \frac{\dot{Y}_1 g_k}{\dot{Y}_k g_1} \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

де  $k$  – номер пари симетричних каналів, що відраховується від центру ФАР;  $\dot{Y}_k$  – амплітуда сигналу  $k$ -ї симетричної пари.

Вагові коефіцієнти  $g_k$  і  $\zeta_k$  для довільного впливу фазових флуктуацій по відношенню до адитивних шумових коливань залежать від інтервалу  $(2k-1)d$  між симетричними елементами антенної решітки, амплітудної ваги й параметра

$$\gamma = q^2 \sigma_\phi^2 (1-a), \quad (5)$$

де  $q^2$  – відношення сигнал-шум за потужністю;  $\sigma_\phi^2$  – дисперсія фазових флуктуацій сигналів в елементах антенної решітки;  $a$  – коефіцієнт кореляції фазових флуктуацій в сусідніх елементах антенної решітки.

Дисперсія загальної помилки  $\sigma_\theta^2$  вимірювання кута приходу сигналу визначається сумою дисперсії складової помилки  $\sigma_{\phi_l}^2$ , що викликана фазовими флуктуаціями сигналу в приймальних елементах ФАР і дисперсії складової помилки  $\sigma^2$ , що викликана адитивними шумовими коливаннями

$$\sigma_\theta^2 = \sigma_{\phi_l}^2 + \sigma^2. \quad (6)$$

Передбачається, що фазові флуктуації розподілені за нормальним законом з нульовим середнім і дисперсією  $\sigma_\phi^2$ . Коефіцієнт міжканальної кореляції фазових флуктуацій сигналів описаний експоненційною залежністю.

При цьому, вираз для дисперсії флуктуаційної складової помилки вимірювання кута приходу сигналу [3] має вид

$$\sigma_{\phi_l}^2 = \frac{9\sigma_\phi^2 \lambda^2}{2\pi^2 d^2 m^2 (4m^2 - 1)^2} \left[ \sum_{j=1}^m (2j-1)^2 (1-a^{(2j-1)}) + 2 \sum_{k=1}^{m-j} a^k \sum_{j=1}^{m-1} (2j-1)(2j+2k-1)(1-a^{(2j-1)}) \right]. \quad (7)$$

У випадку переважного впливу адитивних шумових коливань по відношенню до фазових флуктуацій ( $\gamma \ll 1$ ) дисперсія оцінювання кутової координати [3] для ФАР з рівномірним амплітудним розподілом визначається згідно виразу

$$\frac{1}{\sigma^2} = \frac{q^2 (4m^2 - 1)}{12} \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \right)^2. \quad (8)$$

В даному випадку кутова координата цілі може бути визначена згідно виразу (1).

У випадку переважного впливу фазових флуктуацій по відношенню до адитивних шумових коливань ( $\gamma \gg 1$ ) дисперсія оптимального оцінювання кутової координати цілі з врахуванням фазових флуктуацій сигналу і адитивних шумових коливань в РЛС з ФАР [6] при  $m \geq 2$  визначається виразом

$$\frac{1}{\sigma_{\text{опт}}^2} = 2 \left( \frac{\pi d \cos \theta_{ц}}{\lambda} \right)^2 \frac{1-a}{\sigma_\phi^2 (1+a)} \times \left\{ \sum_{k=1}^{m-1} (2k-1)^2 + \frac{(2m-1)[2m-1-(2m-3)a]}{(1-a)^2} \right\}; \quad (9)$$

при  $m = 1$

$$\frac{1}{\sigma^2} = 2 \left( \frac{\pi d \cos \theta_{ц}}{\lambda} \right)^2 / \sigma_\phi^2 (1-a). \quad (10)$$

В цьому випадку кутову координату цілі доцільно оцінювати згідно алгоритмів (2) або (3).

В РЛС з ФАР оглядового типу для реалізації двовимірного (по азимуту та куту місця) кругового огляду широко застосовують плоскі ФАР. При цьому може здійснюватись механічне переміщення променя по азимуту шляхом обертання антени і послідовне переміщення променя ФАР по куту місця електронним способом з вимірюванням кута місця цілі фазовим методом. В даному випадку принцип вимірювання кута місця базується на визначенні вертикального нахилу хвилі, яка створена відбитим від цілі сигналом.

На вертикальну антенну решітку з еквідистантно розташованими елементами падає електромагнітна хвиля, відбита від цілі, яка знаходиться під кутом місця  $\varepsilon$ . Оскільки цілі знаходиться на відстані, що значно перевищує розміри антенної системи, то фронт хвилі вважається плоским.

Сигнали в різних приймальних каналах АР матимуть відносно першого каналу фазові зсуви  $\psi_i$ , значення яких дозволяють визначити кут місця цілі

$$\varepsilon_{ц} = \arcsin \frac{\psi_i \lambda}{2\pi(i-1)d}. \quad (11)$$

Після визначення кута місця цілі може бути розрахована висота цілі. Розрахунок висоти цілі з урахуванням кривизни Землі та нормальної тропосферної рефракції здійснюється згідно виразу

$$H_{ц} = D_{ц} \sin \varepsilon_{ц} + \frac{D_{ц}^2}{2R_{зе}} + h_a, \quad (12)$$

де  $D_{ц}$  – дальність до цілі;  $R_{зе}$  – еквівалентний радіус Землі;  $h_a$  – висота встановлення антени.

Середньоквадратична помилка (СКП) вимірювання кута місця цілі  $\sigma_{\varepsilon}$  може бути перерахована в СКП вимірювання висоти  $\sigma_H$  за допомогою виразу (12).

Оцінювання ефективності оптимізації просторової обробки радіолокаційного сигналу в оглядових РЛС з ФАР можна оцінити відношенням виду:

$$B = \sigma_{\theta}^2 / \sigma_{\theta_{опт}}^2. \quad (13)$$

За допомогою відношення (13) з урахуванням виразів (6) – (10) та (12) можна оцінити можливість підвищення точності вимірювання висоти цілі за рахунок врахування фазових флуктуацій сигналу в каналах ФАР РЛС оглядового типу.

На рис. 1 наведені графіки залежності СКП вимірювання висоти цілі  $\sigma_H$  в метрах від дальності до цілі  $D_{ц}$  в кілометрах.

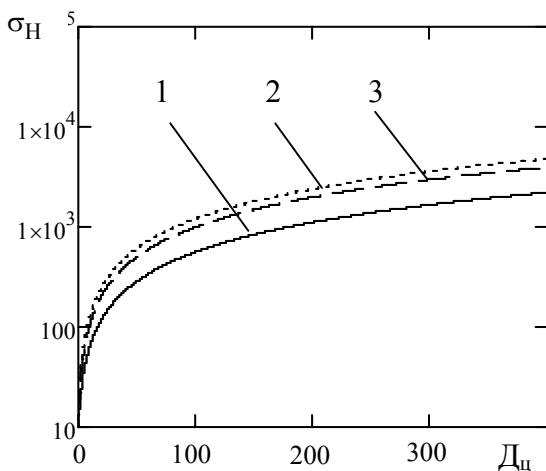


Рис. 1. Залежність СКП вимірювання висоти від дальності до цілі

Графіки отримані для наступних вхідних даних:  $m = 10$ ;  $\lambda = 0,1$  м.;  $q^2 = 100$ ;  $d = \lambda/2$ ;  $h_a = 10$  м.;  $\sigma_{\varphi}^2 = 1$  рад<sup>2</sup>;  $a = 0,99$ .

На рис. 1 криві 1 – 3 відповідають наступним випадкам: крива 1 – впливу лише внутрішнього шуму;

крива 2 – впливу фазових флуктуацій і внутрішнього шуму; крива 3 – врахування фазових флуктуацій при вимірюванні висоти цілі.

З отриманих графіків видно, що на дальності 100...400 км СКП вимірювання висоти цілі  $\sigma_H$  здатна досягати величин від сотень метрів до одиниць кілометрів (крива 1). За рахунок впливу флуктуацій фронту хвилі прийнятого сигналу СКП вимірювання висоти цілі додатково збільшується на сотні метрів (крива 2). Врахування цих викривлень дозволяє частково знизити цю помилку (крива 3).

На рис. 2 надані графіки залежності відношення  $B$  від дальності до цілі  $D_{ц}$  в кілометрах.

Графіки отримані для визначених вище вхідних даних при різних значеннях коефіцієнта міжелементної кореляції:  $a = 0,99$  (крива 1);  $a = 0,9$  (крива 2);  $a = 0,8$  (крива 3);  $a = 0,5$  (крива 4).

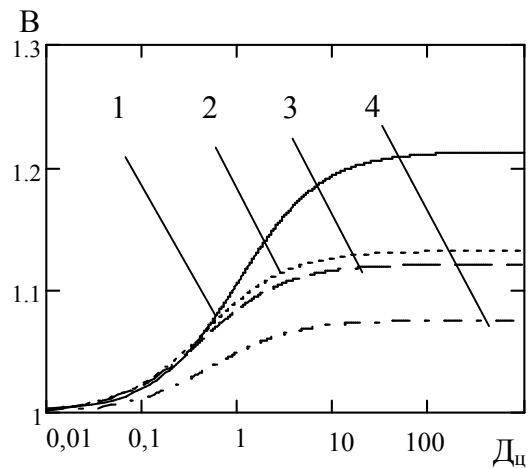


Рис. 2. Залежність відношення  $B$  від дальності до цілі при різних значеннях коефіцієнта міжелементної кореляції

З кривих на рис. 2 видно, що на дальностях виконання РЛС завдань за призначенням (від декілька десятків до декілька сотень кілометрів), підвищення точності вимірювання висоти цілі при врахуванні фазових флуктуацій складає від 7 до 21 % в залежності від коефіцієнта міжелементної кореляції.

Таким чином, ефективність застосування алгоритму оптимального вимірювання кутових координат тим вище, чим вище міжелементна кореляція флуктуації фазового фронту прийнятого сигналу. Дана ефективність є найбільшою у випадку зменшення просторової когерентності прийнятого сигналу лише на одиниці відсотків.

На рис. 3 надані графіки залежності відношення  $B$  від дисперсії фазових флуктуацій  $\sigma_{\varphi}^2$  при наведених вище вхідних даних за умовою  $a = 0,99$ .

Наведені на рис. 3 графіки відповідають різним дальностям до цілі:  $D_{ц} = 100$  км (крива 1);  $D_{ц} = 200$  км (крива 2);  $D_{ц} = 300$  км (крива 3).

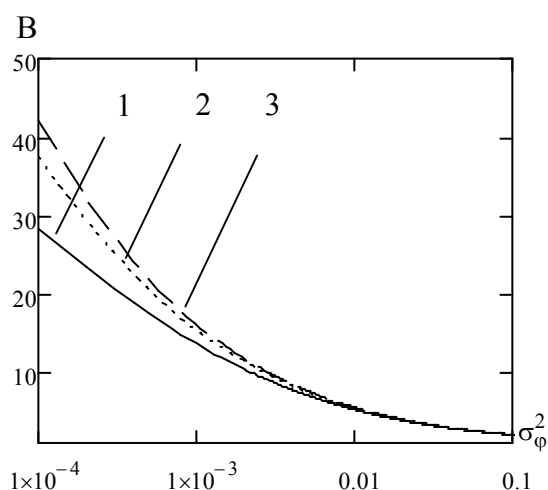


Рис. 3. Залежність відношення В від дисперсії фазових флукуацій  $\sigma_{\phi}^2$

Згідно отриманих графіків, зі зменшенням дисперсії фазових викривлень прийнятого сигналу в каналах антенної решітки ефективність просторової обробки радіолокаційного сигналу збільшується до десятків разів.

В [7] наведені величини дисперсії фазових флукуацій, для різних умов поширення сигналу і станів тропосфери, які приймають значення  $0,44 \cdot 10^{-4} \dots 19,4 \text{ рад}^2$ .

Таким чином, при невеликій інтенсивності флукуацій фазового фронту хвилі прийнятого сигналу їх врахування забезпечує суттєве підвищення точності кутових вимірювань в РЛС ФАР. Зі зростанням дисперсії фазових флукуацій до одиниць  $\text{рад}^2$  і більше їх врахування є недоцільним внаслідок великої інтенсивності.

## Висновки

Наведені в роботі результати вказують на необхідність оптимізації просторової обробки за раху-

нок врахування флукуацій фронту хвилі прийнятого радіолокаційного сигналу в елементах ФАР.

Доцільність проведення вказаної оптимізації визначається статистичними характеристиками фазових флукуацій. Ефективність врахування флукуацій фронту хвилі прийнятого сигналу збільшується зі зменшенням дисперсії та збільшенням міжелементної кореляції фазових флукуацій.

## Список літератури

1. Радиоэлектронные системы. – Основы построения и теория / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Радиоэлектронные системы. – Основы построения и теория / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с.
3. Кузнецов О.Л. Обмеження якості просторових вимірювань в РЛС з фазованою антенною решіткою внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та земної поверхні / О.Л. Кузнецов, О.Б. Танцюра, О.Л. Мельник // Системи управління навігації та зв'язку. – К: ДП «ЦНДІ навігації і управління», 2012. – Вип. 1 (21), том 2. – С. 49-52.
4. Минервин Н.Н. Оптимальное оценивание угла прихода волны при наличии случайных искажений ее фронта и аддитивных помех / Н.Н. Минервин, К.С. Васюта // Радиотехника. – Х.: ХТУРЭ, 1998. – Вып. 105. – С. 61-68.
5. Кузнецов О.Л. Підвищення якості просторових вимірювань в цифрових РЛС з фазованою антенною решіткою / О.Л. Кузнецов, В.А. Чепурний // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 2(42). – С. 113-115.
6. Минервин Н.Н. Мера угловой разрешающей способности и точность измерения угла прихода волны при наличии случайных искажений ее фронта и аддитивного шума / Н.Н. Минервин, К.С. Васюта // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: ХНУРЭ, 2013. – Вып. 12, № 4. – С. 484-486.
7. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Сов. радио, 1970. – 383 с.

Надійшла до редколегії 21.10.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Васюта, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА В РЛС С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

А.Л. Кузнецов

В статье проводится численный анализ возможностей повышения точности измерения угловых координат цели при оптимизации пространственной обработки радиолокационного сигнала в РЛС с фазированной антенной решеткой. Полученные результаты позволяют оценить возможности усовершенствования фазового метода измерения угловых координат цели.

**Ключевые слова:** фазированная антенная решетка, угловая координата, радиолокационный сигнал, фазовый метод.

## EFFICIENCY ESTIMATION OF OPTIMIZATION OF SPATIAL RADIOLOCATION SIGNAL PROCESSING IN RADAR WITH PHASED ANTENNA ARRAY

A.L. Kuznetsov

Numerical analysis of increase possibilities of accuracy of measuring angular target's coordinates during optimization of the spatial radiolocation signal processing in radar with phased antenna array is obtained in the article. The got results allow to estimate improvement possibilities of measuring phase method of angular target's coordinates.

**Keywords:** phased antenna array, angular coordinate, radiolocation signal, phase method.