

УДК 621.396.96

О.Л. Кузнецов, В.А. Чепурний

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОСТОРОВИХ ВИМІРЮВАНЬ В ЦИФРОВИХ РЛС З ФАЗОВАНОЮ АНТЕННОЮ РЕШІТКОЮ

У статті показано можливість оптимізації кутових вимірювань в РЛС з фазованою антенною решіткою та цифровою обробкою радіолокаційного сигналу. Наведені пропозиції базуються на вдосконаленні дискретного перетворення Фур'є за рахунок введення в нього спеціальних вагових коефіцієнтів, які враховують вплив випадкових викривлень фронту хвилі радіолокаційного сигналу.

Ключові слова: кутова координатна, ціль, фазована антенна решітка, радіолокаційний сигнал.

Вступ

Постановка проблеми. Перспективи розвитку сучасного радіолокаційного озброєння пов'язані з використанням в сучасних РЛС фазованих антенних решіток (ФАР) та цифрової обробки радіолокаційного сигналу.

В РЛС з ФАР визначення кутових координат цілей засновано на вимірюванні кутового положення хвильового фронту відбитої електромагнітної хвилі (ЕМХ) відносно приймальної апертури. Наявність атмосферних неоднорідностей, складності форми і конфігурації цілі та відбиття сигналу від заважаючих об'єктів призводять до флуктуацій фронту хвилі прийнятого сигналу, що викликає порушення його просторової когерентності. Вказані флуктуації обмежують точність вимірювання кутових координат цілей і потребують врахування при цифровій просторовій обробці прийнятого сигналу.

Аналіз результатів останніх досліджень і публікацій. Питання оптимальної обробки сигналу на фоні внутрішнього шуму приймального пристрою розглядалися в роботах [1, 2]. Особливостям цифрової узгодженої обробки радіолокаційного сигналу присвячена робота [3]. В роботах [4, 5] наведені пропозиції щодо врахування спільного впливу корельованих фазових флуктуацій і адитивних шумових коливань при просторовій і часово-частотній обробці радіолокаційного сигналу. Представляє практичну користь впровадження отриманих результатів в алгоритми цифрової просторової обробки радіолокаційного сигналу.

Метою статті є розробка пропозицій щодо оптимізації цифрової просторової обробки радіолокаційного сигналу за рахунок врахування флуктуацій фронту прийнятої хвилі.

Основний матеріал

В РЛС з ФАР найчастіше використовується фазовий метод вимірювання кутових координат. Інформація про кутову координату міститься в різниці фаз коливань сусідніх каналів (елементів) прийому. Фазовий метод вимірювання кутових координат

полягає у визначенні напрямку надходження фронту ЕМХ відносно початкового (опорного) напрямку.

Кутова координата цілі $\theta_{ц}$ відносно рівнофазного напрямку (РФН) визначається згідно виразу

$$\theta_{ц} = \arcsin \frac{\Psi_0 \lambda}{2 \pi d} \quad (1)$$

де Ψ_0 – набіг фаз між сусідніми каналами прийому; d – відстань між каналами прийому; λ – довжина хвилі РЛС. При цьому фронт хвилі відбитої від цілі, що знаходиться на відстані $r \gg d$ вважають плоским.

Встановленням відповідних фазових зсувів у каналах прийому (рис. 1) для кожного значення кута θ із заданого діапазону реалізується переміщення (сканування) діаграми спрямованості антени (ДСА) у просторі. При цьому максимум комплексної амплітуди сигналу \dot{Y}_{Σ} на виході ФАР забезпечується лише у разі надходження ЕМХ з напрямку θ .

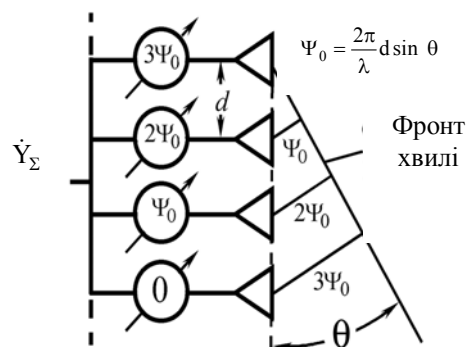


Рис. 1. Принцип виміру координат у ФАР

В дійсний час одержали інтенсивний розвиток антенні решітки з цифровим формуванням ДСА – цифрові антенні решітки (ЦАР).

У ЦАР аналоговий сигнал, прийнятий кожним елементом, перетворюється в цифровий код і подається на систему формування діаграм спрямованості

В цій системі здійснюється дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) оцифрованих сигналів і формування таким чином ДС антени на прийом.

При реалізації ДПФ для отримання інформації про кутову координату за умови нумерації елементів ФАР з нуля, результат обробки \dot{Y}_Σ коливань в М – елементній ФАР буде мати такий вигляд:

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

де $u_i = -M\psi_i/2\pi$; ψ_i – різниця фаз коливань y_k і y_{k+1} каналів ФАР, що відповідає вимірюваному напрямку θ_i . З точки зору антенної техніки це означає формування ДСА на прийом з максимумом у напрямку θ_i . Алгоритм оптимального оцінювання кута приходу хвилі, як показано у роботі [4], описується виразом

$$\theta_u = \arcsin \frac{\lambda}{2\pi d} \sum_{k=1}^m g_k \Delta\Phi_k, \quad (3)$$

де $\Delta\Phi_k = \Phi_{m+1-k} - \Phi_{m+k}$ – значення різниці фаз сигналів k-ї симетричної пари каналів антенної решітки, яка відраховується від 1 у центрі до m на її краях; g_k – вагові коефіцієнти, які враховують сумісний вплив фазових флуктуацій і адитивних шумових коливань.

З співвідношення (3) видно, що оптимальне оцінювання кута приходу сигналу можна реалізувати шляхом вимірювання різниць фаз у симетричних каналах ФАР з наступним їх складанням з ваговими множниками g_k , методика розрахунку яких наведена в [5]. Як показано у роботі [6], при переважному впливі фазових флуктуацій над адитивними коливаннями внутрішніх шумів, вагові коефіцієнти g_k від 1 до $m-1$ - каналів описуються співвідношенням

$$g_k = (2k-1)^2 / K(a), \quad (4)$$

а крайні канали мають найбільшу вагу

$$g_m = [2m-1-(2m-3)a] / (1-a)^2 / K(a), \quad (5)$$

де a – коефіцієнт кореляції фазових флуктуацій в сусідніх елементах антенної решітки;

$$K(a) = \sum_{k=1}^{m-1} (2k-1)^2 + (2m-1) \times \\ \times [2m-1-(2m-3)a] / (1-a)^2.$$

Таким чином, значення вагових коефіцієнтів збільшуються зі збільшенням номера симетричної пари елементів ФАР. 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

$$\dot{Y}_\Sigma(u_i) = \sum_{k=0}^{M-1} \zeta_k y_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{M} k \cdot u_i\right\}, \quad (6)$$

тобто, алгоритм ДПФ підлягає модифікації, яка полягає у введенні в нього спеціальних вагових коефі-

цієнтів ζ_k . Вагові коефіцієнти ζ_k можуть бути перераховані з вагових коефіцієнтів g_k таким чином:

$$\frac{\zeta_k}{\zeta_1} = \frac{1}{(2k-1)^2} \frac{\dot{Y}_1 g_k}{\dot{Y}_k g_1}; \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

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

Вагові коефіцієнти g_k [5] 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

$$\gamma = q^2 \sigma_\phi^2 (1-a), \quad (8)$$

де σ_ϕ^2 – дисперсія фазових флуктуацій сигналів в елементах ФАР; q^2 – відношення сигнал-шум за потужністю. Для переважного впливу фазових флуктуацій по відношенню до адитивних шумових коливань виконується умова $\gamma \gg 1$ й вагові коефіцієнти g_k визначаються згідно виразів (4) і (5).

Співвідношення (7) достатньо для визначення вагових коефіцієнтів ζ_k , оскільки величини даних коефіцієнтів не грають ролі, а мають значення тільки співвідношення між ними. Симетричність вагових коефіцієнтів ζ_k щодо центру ФАР дозволяє істотно скоротити об'єм обчислень при реалізації модифікованого алгоритму ДПФ. На рис. 2 надані графіки залежностей відносин вагових коефіцієнтів ζ_k/ζ_1 від значень параметра γ для десяти елементів ФАР при різних значеннях коефіцієнта міжелементної кореляції γ а = 0,5 а = 0,9 а = 0 ζ_3/ζ_1 фазових флуктуацій.

З графіків видно, що при переважному впливі адитивного шуму ($\gamma \ll 1$), відносини вагових коефіцієнтів ζ_k/ζ_1 приймають значення близькі до одиниці. Таким чином, величини вагових коефіцієнтів, що відповідають парам симетричних елементів антенної решітки, мало відрізняються один від одного і враховують незначний вплив внутрішніх шумів приймального пристрою.

Із збільшенням значення параметра γ (зростанні впливу корельованих фазових флуктуацій), значення відносин ζ_k/ζ_1 збільшуються зі зростанням номера пари. При цьому, для всіх симетричних пар окрім крайньої вони збільшуються до деяких граничних значень, після чого зменшуються до одиниці при подальшому зростанні параметра γ .

При переважному впливі корельованих фазових флуктуацій ($\gamma \gg 1$) відношення ζ_5/ζ_1 , що відповідає крайній парі симетричних елементів антенної решітки, приймає найбільші значення.

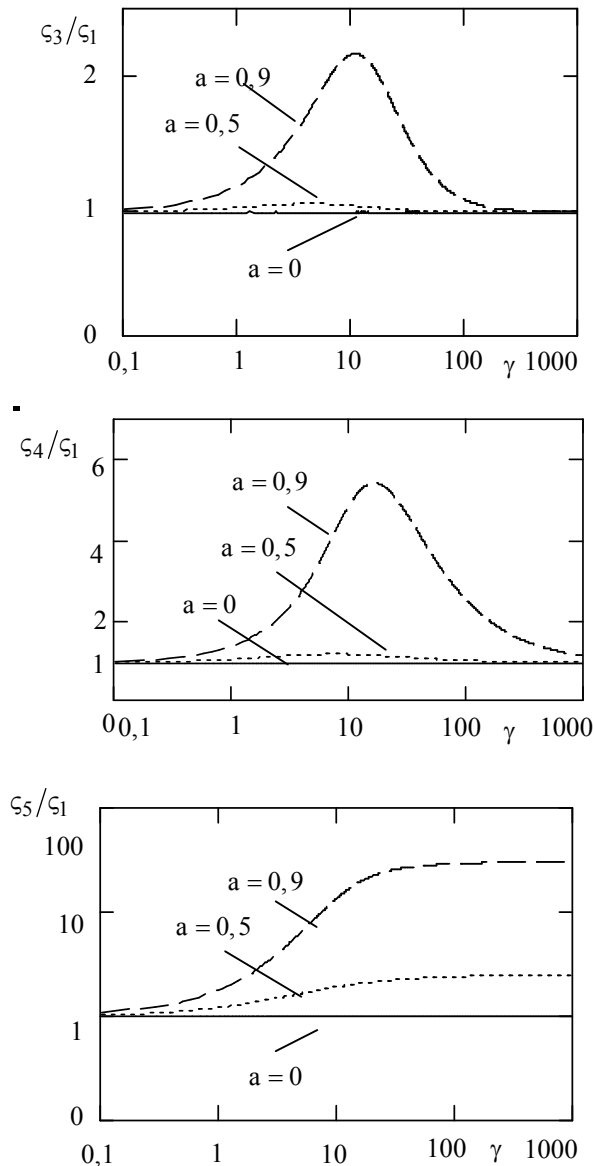


Рис. 2 Залежності відносин вагових коефіцієнтів від параметру γ

Таким чином, ваговий коефіцієнт ζ_k , який відповідає крайній парі симетричних каналів антенної решітки, приймає найбільшу величину, і це значення тим більше, чим вище когерентність прийнятого сигналу.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЦИФРОВЫХ РЛС С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

А.Л. Кузнецов, В.А. Чепурной

В статье показана возможность оптимизации угловых измерений в РЛС с фазированной антенной решеткой и цифровой обработкой радиолокационного сигнала. Приведенные рекомендации основываются на совершенствовании дискретного преобразования Фурье за счет введения в него специальных весовых коэффициентов, которые учитывают влияние случайных скажжений фронта волны радиолокационного сигнала.

Ключевые слова: угловая координата, цель, фазированная антенная решетка, радиолокационный сигнал.

UPGRADING OF SPATIAL MEASURING IN DIGITAL RADARS WITH PHASE ARRAY

A.L. Kuznetsov, V.A. Chepurnoy

The optimization possibility of angular measuring in radars with phase array and digital radiolocation signal processing is obtained in the article. The recommendations are based on improving the discrete Fourier transform with using special coefficients. These coefficients provide accounting for the influence fluctuations front waves of the radiolocation signal.

Keywords: angular coordinate, target, phase array, radiolocation signal.

Можливе підвищення точності вимірювання кутової координати цілі за рахунок врахування фазових флуктуацій, як показано у роботі [5], може складати від одиниць до десятків разів, що свідчить про ефективність запропонованого алгоритму.

Висновки

При оцінюванні кутової координати в РЛС з ФАР за допомогою ДПФ, врахування спільного впливу адитивних шумових коливань і корельованих фазових флуктуацій може бути здійснено введенням в алгоритм вимірювання спеціальних вагових коефіцієнтів. При переважному впливі корельованих фазових флуктуацій ваговий коефіцієнт ζ_k , який відповідає крайній парі симетричних каналів антенної решітки, приймає найбільшу величину, що обумовлено найбільшим внеском цієї пари в точність виміру кутової координати.

Список літератури

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / под. ред. Я.Д. Ширмана. – М: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с.
2. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М: Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация / С.З. Кузьмин. – К: «КВИЦ». 2000. 428 с.
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: ХНУРЕ, 1998. – Вып. 105. – С. 61-68.
5. Минервин Н.Н. Оптимальные алгоритмы измерения радиальной скорости цели и угла прихода принимаемого радиосигнала с учетом фазовых флуктуаций, описываемых произвольной корреляционной функцией / Н.Н. Минервин, А.Л. Кузнецов // Прикладная радиоэлектроника. – Х: ХНУРЕ, 2013. – Вып. 12, № 4. – С. 514-517.
6. Минервин Н.Н. Особенности компенсации помеховой волны при флуктуациях ее фазового фронта / Н.Н. Минервин, К.С. Васюта // Прикладная радиоэлектроника. – Х: ХНУРЕ, 2013. – Вып. 12, № 4. – С. 493-495.

Надійшла до редколегії 16.04.2015

Рецензент: д-р. техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.