

УДК 621.396.967

В.В. Вишнівський, В.І. Куташев, Ю.Б. Настич

Військовий інститут Київського національного університету імені Т. Шевченка, Київ

МЕТОД ВЕКТОРНОЇ ОЦІНКИ КУТА МІСЦЯ ЦІЛЕЙ В ПРИЗЕМНОМУ ШАРІ

Запропонований і теоретично обґрунтований новий метод і алгоритм виміру кута місця цілей з малою висотою польоту, коли в результаті інтерференції прямого сигналу й перевідбитого поверхнею (“антипода”) суттєво спотворюється діаграма спрямованості в площині кута місця й значно зменшуються дальність можливого виміру висоти цілей. Метод заснований на процедурі векторної оцінки кута місця за результатами виміру кутового положення цілі і її “антипода”.

Ключові слова: діаграма спрямованості антени, фазована антенна решітка, просторовий фільтр, середньоквадратична помилка.

Вступ

Постановка проблеми. Складність радіолокації цілей у приземному шарі на малих кутах місця з необхідними показниками якості обумовлена рядом відомих причин, з яких до непереборних, крім кривизни земної поверхні, відноситься явище інтерференції прямого сигналу цілі й перевідбитого поверхнею землі (так званого, “антипода”). Останнє створює сильну порізанисть діаграми спрямованості (ДС), особливо на кутах місця, менших $\lambda/8h_a$ (λ - довжина хвилі, h_a – висота підйому фазового центру антени). При цьому, крім виникнення інтерференційних втрат при виявленні, суттєво ускладнюється вимір кута місця цілей класичним методом (за максимумом) і, внаслідок цього якість визначення висоти.

Для зменшення ступеня впливу інтерференції на якість виявлення – виміру цілей з малими кутами місця в окремих РЛС застосовують багатоперехові антенні системи. Однак подібний спосіб має низьку ефективність підвищення якості виміру кута місця, тому що вплив на результат інтерференції залежить від позиції навколо РЛС і не забезпечуються можливості оперативної зміни положень інтерференційних провалів у зоні видимості РЛС.

Одним з перспективних напрямків удосконалення засобів радіолокації ПС є застосування антен типу фазованих антенних решіток (ФАР) і цифрових систем просторово-часової обробки сигналів. Кардинальним заходом підвищення точності виміру кута місця цілей (і визначення їх висоти) при 2-х променевому поширенні радіохвиль є усунення або істотне зменшення впливу перевідбитого сигналу на порізанисть ДС або застосування нових алгоритмів виміру кута місця, які мають властивість інваріантності до форми ДС. У статті представлений варіант вирішення сформульованого завдання.

Аналіз останніх публікацій по темі статті. В одній з останніх публікацій по тематиці що розглядається [3] запропонований метод виміру кута місця в РЛС із ФАР, заснований на застосуванні просторово-

го режекторного фільтра що перебудовується, який компенсує в значній мірі заважаючий сигнал “антипода”. Метод дозволяє підвищити дальність визначення висоти цілей з малим кутом місця до дальності виявлення з відносною помилкою $\leq 10\%$. Його недоліком є зсув оцінки, що виникає при вимірюванні кута місця, для усунення якого потрібно приймати додаткові засоби обробки в структурі вимірювача.

Мета статті: теоретично обґрунтувати метод і алгоритм виміру малих кутів місця, заснований на погодженій просторовій фільтрації сигналів цілі й “антипода” і процедурі векторної оцінки кута місця “складної” цілі, що складається з 2-х жорстко зв'язаних джерел випромінювань.

Зміст основного матеріалу

Запропонований метод виміру кута місця цілі на малій висоті являє собою нетрадиційний метод спільної оцінки двовимірного вектора, який визначає положення “складної” цілі, що складається з 2-х зв'язаних і рознесених по куту місця точок: цілі і її “антипода”. Він заснований на “погодженій” фільтрації прийнятого сигналу “складної” цілі з 2-х відбиваючих точок. Цей метод передбачає проекцію вихідних сигналів ФАР на підпростір, утворене стовпцями матриці $W_1 = [v_1 \ v_2]$, з подальшим обчисленням квадрата норми сигналу на виході просторового фільтра, що перебудовується.

Для одержання алгоритму квазіоптимальної системи просторової фільтрації використовується альтернативний метод синтезу, заснований на положеннях функціонального аналізу, зокрема, теореми ортогонального проектування [1]. Відповідно до цієї теореми, шляхом використання базисних функцій $V = [v_1, v_2, \dots, v_m]$ для будь-якого заданого сигнального вектора X (із простору $L^2(T)$) може бути знайдений найбільш близький (у середньоквадратичному сенсі) до нього вектор \hat{X} , такий, що

$$(X - \hat{X})^H (X - \hat{X}) = \min .$$

Вибір ортогонального простору проводиться на підставі алгебри проекторів [2]. У цьому випадку

$$\hat{X} = \text{pr} \cdot X,$$

де $\text{pr} = V(V^H V)^{-1} V^H$ – проектор, який задається стовпцями матриці V .

Чим краще обраний матричний проектор, тим легше його технічна реалізація з точки зору обчислювальних витрат, які в кожному разі менші в порівнянні з оптимальним алгоритмом просторової фільтрації, що вимагає обчислення елементів зворотної кореляційної матриці прийнятих сигналів.

З урахуванням загального визначення проектора й введених вище позначень, характеристику матричного фільтра, що перебудовується, у схемі вимірювача можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \text{pr}_2 &= W_1 (W_1^H W_1)^{-1} W_1^H = \\ &= \frac{v_1 v_1^H - v_1 d_{12e} v_2^H - v_2 d_{12e}^* v_1^H + v_2 v_2^H}{N(1 - d_{12e}^2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

де v_1 й v_2 – N -мірні вектор-стовпці, k -ті елементи яких відповідно дорівнюють:

$$\begin{aligned} v_1^{(k)} &= \exp[j \cdot (k-1)\pi \cdot \sin \varepsilon_{\text{ET}}]; \\ v_2^{(k)} &= \exp[-j \cdot (k-1)\pi \cdot \sin \varepsilon_{\text{ET}}]; \quad d_{12e} = v_1^H \cdot v_2 / N. \end{aligned}$$

Квадрат норми сигналу на виході просторового фільтра, що перебудовується (ПФ) однозначно пов'язаний з потужністю сигналу. Тому пеленгаційна характеристика розглянутого пристрою може бути визначена в такий спосіб:

$$\begin{aligned} p_{2p}(\varepsilon_{\text{ET}}) &= \bar{u}_p^H \cdot \text{pr}_2 \cdot \bar{u}_p = \\ &= p_{c1} \cdot (\bar{v}_{c \text{ пр}} - \delta \cdot \bar{v}_{c \text{ пер}})^H \cdot \text{pr}_2 \cdot (\bar{v}_{c \text{ пр}} - \delta \cdot \bar{v}_{c \text{ пер}}). \end{aligned} \quad (2)$$

Вважаючи $\delta=1$ і використовуючи співвідношення (2), після ряду перетворень одержимо:

$$\begin{aligned} p_{2p}(\varepsilon_{\text{ET}}) &= p_{c \text{ пр}} + p_{c \text{ пер}} - \Delta p, \\ p_{c \text{ пр}} &= u_{c \text{ пр}1}^2 \cdot \bar{v}_{c \text{ пр}}^H \cdot \text{pr}_2 \cdot \bar{v}_{c \text{ пр}} = \\ &= p_{c1} \frac{d_{1a}^2 + d_{1b}^2 - 2d_{1a}d_{1b}d_{12e}}{N(1 - d_{12e}^2)}, \\ p_{c \text{ пер}} &= u_{c \text{ пр}1}^2 \cdot \bar{v}_{c \text{ пер}}^H \cdot \text{pr}_2 \cdot \bar{v}_{c \text{ пер}} = \\ &= p_{c1} \frac{d_{1a}^2 + d_{1b}^2 - 2d_{1a}d_{1b}d_{12e}}{N(1 - d_{12e}^2)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{1a} &= \frac{\sin[0,5N\pi(\sin \varepsilon_{\text{ET}} - \sin \varepsilon_{\text{Ц}})]}{N \sin[0,5\{\sin \varepsilon_{\text{ET}} - \sin \varepsilon_{\text{Ц}}\}]}, \\ d_{1b} &= \frac{\sin[0,5N\pi(\sin \varepsilon_{\text{ET}} + \sin \varepsilon_{\text{Ц}})]}{N \sin[0,5\{\sin \varepsilon_{\text{ET}} + \sin \varepsilon_{\text{Ц}}\}]}, \end{aligned}$$

де $p_{c \text{ пр}}$ – потужність прямого сигналу на виході ПФ, що перебудовується, $p_{c \text{ пер}}$ – потужність перевердби-

того сигналу на виході, ПФ що перебудовується,

$$\begin{aligned} \Delta p &= 2 \text{Re} \{ u_{c \text{ пр}1}^2 \cdot \bar{v}_{c \text{ пр}}^H \cdot \text{pr}_2 \cdot v_{c \text{ пер}} \} = \\ &= 2p_{c1} \frac{[2d_{1a}d_{1b} - (d_{1a}^2 + d_{1b}^2) \cdot d_{12e}] \cos \Delta \psi}{N(1 - d_{12e}^2)}. \end{aligned}$$

Поєднуючи записані вище співвідношення, остаточно одержимо:

$$\begin{aligned} p_{2p}(\varepsilon_{\text{ET}}) &= p_{c1} \times \\ &\times \frac{2(d_{1a}^2 + d_{1b}^2) \cdot (1 + d_{12e} \cos \psi) - 4d_{1a}d_{1b}(d_{12e} + \cos \psi)}{N(1 - d_{12e}^2)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Дослідження функціональної залежності (3) на екстремум показує, що при відсутності шумів має місце: $p_{2p} \rightarrow \max$, якщо $\varepsilon_{\text{ET}} = \varepsilon_{\text{Ц}}$.

Для ілюстрації на рис. 1 представлені залежності $\varepsilon_{\text{Ц}} = \arcsin(H_{\text{Ц}} / r - r / 2R_{\text{Зекв}})$ (суцільна лінія) і $\varepsilon_{\text{Ц}}^* = \arg \max p_{2p}(\varepsilon_{\text{ET}})$ (позначена значком *) від висоти польоту цілі $H_{\text{Ц}}$.

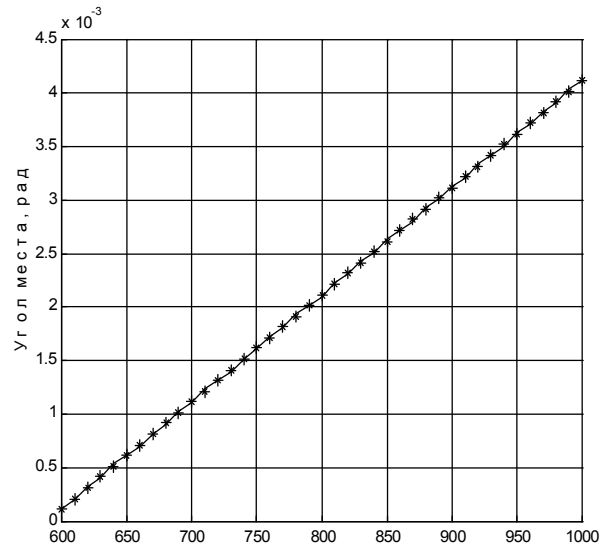


Рис. 1. Залежності $\varepsilon_{\text{Ц}}$ й $\varepsilon_{\text{Ц}}^*$ від висоти польоту цілі

Таким чином, вимірювач кутової координати цілі, що реалізований відповідно до алгоритму оцінки, забезпечує можливість одержання незміщеної оцінки кута місця цілі.

Середньоквадратична похибка (СКП) виміру кута місця цілі при використанні вимірювача кута, реалізованого на основі “погодженого” ПФ, з урахуванням співвідношення, що визначає потенційну СКП кутової координати, буде рівна

$$\sigma_{\varepsilon}(\varepsilon_{\text{Ц}}) = \frac{\lambda}{k_{\varepsilon} \cdot L_{\text{AP}} \cdot \sqrt{2 \cdot p_{2p}(\varepsilon_{\text{Ц}}) / p_{\text{ш п}}}}, \quad (4)$$

де k_{ε} – коефіцієнт, значення якого визначається

розподілом поля в прийомних елементах ФАР;

p_{2p} – потужність результуючого сигналу цілі на виході “погодженого” ПФ при $\varepsilon_{ет} = \varepsilon_{ц}$;

$p_{шp} = \overline{Y_{ш}^H \cdot pr_2 \cdot Y_{ш}}$ – результуюча потужність шуму на виході, “погодженого” ПФ що перебудовується;

$Y_{ш}$ – вектор-стовпець власних шумів прийомних каналів ФАР.

Вважаючи, що $\overline{Y_{ш}^H \cdot pr_2 \cdot Y_{ш}} = p_{ш1} \cdot \text{tr}(pr_2)$, одержимо $p_{шp} = 2p_{ш1}$, де $\text{tr}(pr_2)$ – слід матриці pr_2 .

На рис. 2 представлена залежність складової відносної СКП виміру висоти цілі σ_H / H , що обумовлена похибкою виміру кута місця, від висоти польоту цілі щодо поверхні Землі.

Рисунок відповідає наступним вихідним даним:

- $N=200$,
- $q_1=0$ дБ (залежність 1);
- $q_1=9,5$ дБ (залежність 2).

Дальність до цілі $r=100$ км, висота підйому нижнього елемента ФАР $h_n=15$ м.

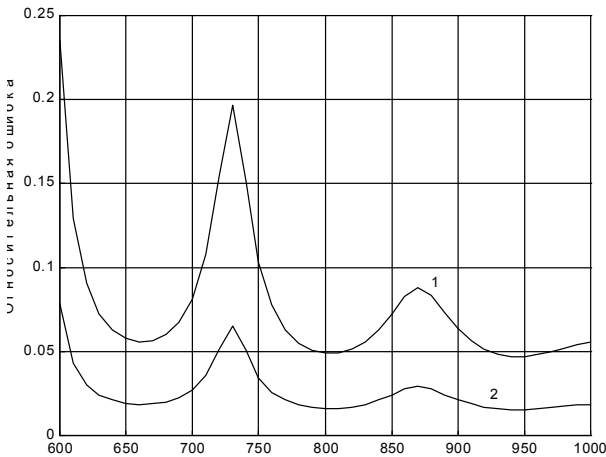


Рис. 2. Залежність відносної помилки виміру висоти цілі від висоти польоту цілі при використанні “погодженого” ПФ

З рисунка видно, що визначення висоти цілі з похибкою, прийнятною для забезпечення бойових дій вогневих засобів ПС, можливо навіть при наявності порівняно невеликого запасу у відношенні сигнал/шум.

Мова про вимір висоти цілі може йти тільки за умови її виявлення. Тому на рис. 3 представлена залежність відношення сигнал/шум на вході блоку оцінки кута місця від висоти польоту цілі за умови, що дальність до цілі рівна 100 км, $N=200$, $q_1=9,5$ дБ. Пунктирною лінією показана границя виявлення. Зіставляючи рис. 2 і рис. 3, можна зробити висновок, що при реалізації запропонованого вимірювача кута місця при $q_1=9,5$ дБ при висотах польоту цілі

$H_{ц} > 650$ м на дальності 100 км можна забезпечити вимір висоти цілі в приземному шарі із відносною похибкою, що не перевищує 6 %. Зі збільшенням відношення сигнал/шум, приблизно на 10 дБ відносна похибка зменшується до 2 %.

Як вже відзначалось вище, кут місця цілі апріорі невідомий, тому ПФ, що перебудовується може бути замінений набором ПФ, що не перебудовуються.

Мінімальна кількість ПФ, що не перебудовуються – N_{ϕ} , при цьому повинне бути рівним

$$N_{\phi} = \Delta\varepsilon / \Delta_{\text{дискр}},$$

де $\Delta\varepsilon$ – діапазон вимірюваних кутів місця;

$\Delta_{\text{дискр}}$ – дискретність настроювання ПФ за кутом місця.

Для забезпечення вимог до точності виміру кута місця цілі параметр $\Delta_{\text{дискр}}$ повинен задовольняти умові

$$\Delta_{\text{дискр}} \leq 2\sqrt{3(\sigma_{\varepsilon \text{ прип}}^2 - \sigma_{\varepsilon \text{ мет}}^2)},$$

де $\sigma_{\varepsilon \text{ прип}}^2$ – припустиме значення дисперсії помилки виміру кута місця, обумовленої методом виміру кутової координати цілі.

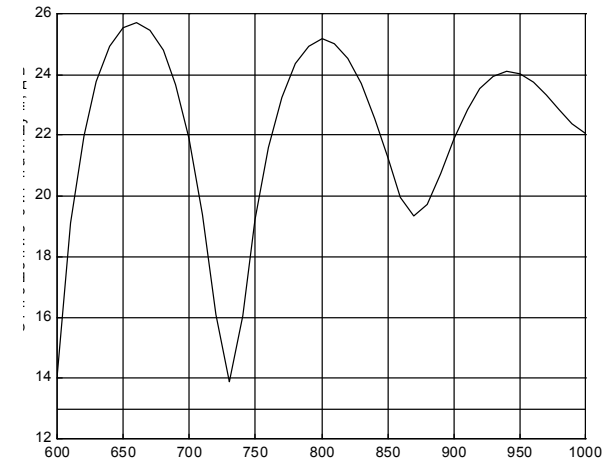


Рис. 3. Відношення сигнал/шум на вході блоку оцінки кута місця цілі

Працездатність і можливість використання методу виміру кута місця в РЛС для цілей в приземному шарі, що передбачає застосування у вимірювачі кута місця ПФ, “погодженого” з ціллю і її антиподом, була підтверджена методом статистичного моделювання.

Відносні відхилення результатів моделювання від результатів розрахунків при $k_{\varepsilon}=1$ і $q=9,5$ дБ ілюструються графіком, що представлений на рис. 4.

Відносне відхилення результатів моделювання оцінювалося за величиною різниці ($СКП_{\text{мод}} - СКП_{\text{РАЗ}}$), нормованої до $СКП_{\text{РАЗ}}$. Аналіз рис. 4 свідчить про досить гарний збіг результатів теоретичного розрахунку і “машинного” експерименту. Деяка розбіжність результатів пояснюється обмеженням

числом випробувань (200).

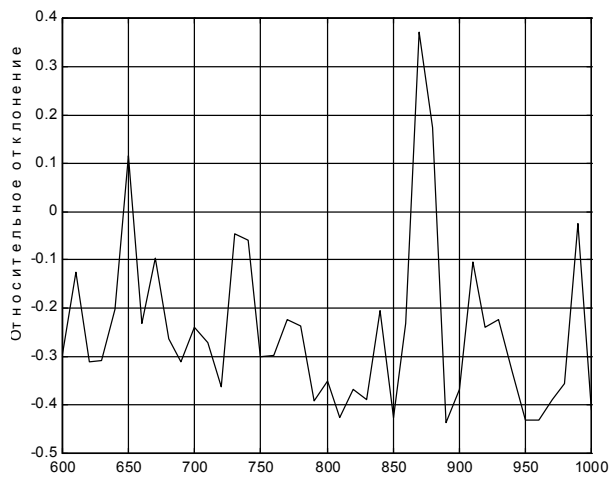


Рис. 4. Порівняння результатів моделювання й розрахунків

Отримані в роботі результати оцінки ефективності запропонованого методу дають підставу стверджувати, що при висотах польоту, більш 650 ... 700 м., і дальності 100 км. метод забезпечує визначення висоти цілі з відносною помилкою, що не перевищує 6%. Точнісні можливості даного методу порівняні з можливостями методу, оснований на використанні режекторного ПФ [3], якщо в останньому усувається зсув оцінки, а для “надмалих” кутів місця (близьких до нуля) можливості даного методу виміру кута місця цілі вище.

Висновок

1. Запропонований метод векторної оцінки кута місця цілей за результатами вимірів кутових координат цілі і її “антипода” слід вважати базовим (як і

альтернативний йому метод, представлений в [3]) для реалізації більш досконалих методів знімання й виміру кута місця при двопробному поширенні радіохвиль.

2. У якості завдання подальших досліджень за даним напрямком можна рекомендувати розробку нових нетрадиційних методів виміру кута місця цілей в приземному шарі і структури просторових фільтрів, що знижують вимоги до часових і обчислювальних витрат у системі обробки сигналів.

Список літератури

1. Френкс Л. Теория сигналов: пер. с англ. / Л. Френкс. – М.: Мир, 1974. – 134 с.
2. Воеводин В.В. Матрицы и вычисления / В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
3. Бондаренко Б.Ф. Підвищення ефективності радіолокації цілі за рахунок зменшення інтерференційних втрат методом кутової режекції дзеркально перевідображеного корисного сигналу / Б.Ф. Бондаренко, В.П. Долгушин, О.В. Мірошніченко. – // Вісник ВІКНУ. – К.: ВІКНУ, 2008. – Вип. 16. – С. 9-14.

Надійшла до редколегії 1.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.І. Сбітнев, Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ.

МЕТОД ВЕКТОРНОЙ ОЦЕНКИ УГЛА МЕСТА ЦЕЛЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

В.В. Вишневский, В.И. Куташев, Ю.Б. Настич

Предложен и теоретически обоснован новый метод и алгоритм измерения угла места целей с малой высотой полёта, когда в результате интерференции прямого сигнала и переотражённого поверхностью (“антипода”) существенно искажается диаграмма направленности в плоскости угла места и значительно уменьшаются дальность возможного измерения высоты целей. Метод основан на процедуре векторной оценки угла места по результатам измерения углового положения цели и её “антипода”.

Ключевые слова: диаграмма направленности антенны, фазированная антенная решетка, пространственный фильтр, среднеквадратичная ошибка.

METHOD OF A VECTOR ESTIMATION OF ANGLE OF ELEVATION OF THE TARGETS IN SURFACE LAYER

V.V. Vyshnivskiy, V.I. Kutashov, Y.B. Nastych

The new method and algorithm of measurement of angle of positions of the targets with low level of flight when as a result of an interference of a forward signal and (“antipode”) rereflected by E-plane pattern of angle of elevation are essentially deformed and considerably decrease range of possible measurement of height of the targets are offered and theoretically proved. The method is based on procedure of a vector estimation of angle of elevation by results of measurement of angular position of the target and its “antipode”.

Keywords: diagram of orientation of aerial, фазированная array, spatial filter, root-mean-square error.