

## МЕТОДИ ВИМІРУ КУТА МІСЦЯ ЦІЛІ В РЛС МАЛОВИСОТНИХ ЦІЛЕЙ НА ОСНОВІ ПРОСТОРОВИХ ФІЛЬТРІВ

*У радіолокаційній станції виявлення маловисотних цілей для оцінки напрямку приходу прямого сигналу цілі формування провалу повинне здійснюватися в напрямку на ділянку поверхні Землі, що є джерелом перевідбитого сигналу. Для формування провалу в діаграмі спрямованості РЛС виявлення маловисотних у статті запропоновано використовувати простороворежсекторний фільтр, реалізований на основі цифрової лінійної антенної решітки матричного фільтра, що перебудовується.*

*Практична реалізація методу дозволить суттєво підвищити зони огляду РЛС виявлення маловисотних цілей, в межах яких одночасно можуть бути визначені всі три координати цілі.*

*Ключові слова: радіолокаційна станція, маловисотна ціль, простороворежсекторний фільтр, діаграма спрямованості, цифрова лінійна антенна решітка.*

**Постановка проблеми та виклад основного матеріалу дослідження.** Один із широко відомих алгоритмів кутового розділення сигналів передбачає формування провалу в діаграмі спрямованості (ДС) приймальною антеною системи РЛС у напрямку на джерело

заважаючого сигналу. У РЛС виявлення маловисотних цілей (МВЦ) для оцінки напрямку приходу прямого сигналу цілі формування провалу повинне здійснюватися в напрямку на ділянку поверхні Землі, що є джерелом перевідбитого сигналу. Для формування провалу в ДС РЛС виявлення МВЦ можна використовувати простороворежекторний фільтр (ПРФ), реалізований на основі цифрової лінійної антенної решітки (ЦЛАР) матричного фільтра, що перебудовується, з характеристикою  $Pr_{10}$ , що визначається як:

$$Pr_{10} = I - \frac{2 \cdot \bar{v}_2 \cdot \bar{v}_2^H}{N_1}, \quad (1)$$

де  $\bar{v}_2$  – вектор-стовпець,  $k$ -й елемент якого дорівнює  $v_2^{(k)} = \exp[-j(k-1)\pi \sin \epsilon_u]$ ,  $k \in \overline{1, N}$ ;  $N$  – число прийомних елементів ЦЛАР, що входить до складу ПРФ, і корелятора з опорним сигналом  $\bar{v}_1(\epsilon_{er})$ .

На рис. 1 представлена структурна схема ПРФ, що забезпечує просторову режекцію перевідбитого від Землі сигналу цілі. Для оцінки можливості використання пристрою, реалізованого за схемою наведеною на рис. 1 для виміру кута місця МВЦ необхідно знайти його пеленгаційну характеристику.



Рис. 1. Структурна схема кутового селектора перевідбитого сигналу

Результуючий сигнал  $z_{рез}$  (без урахування власних шумів і пасивної перешкоди) на виході корелятора в схемі на рис. 1 в  $i$ -тому зондуванні можна визначити таким чином:

$$z_{i\text{рез}} = (Pr_{10} \cdot \bar{u}_{cpi})^H \cdot \bar{v}_1 = u_{npl} \cdot [(Pr_{10} \cdot \bar{v}_{cpi})^H \cdot \bar{v}_1 - (Pr_{10} \cdot \bar{v}_{cперi})^H \cdot \bar{v}_1], \quad (2)$$

де  $\bar{v}_1 = \bar{v}_1(\epsilon_{er})$  – вектор-стовпець опорного сигналу;  $\bar{u}_{cpi} = u_{npl} \cdot (\bar{v}_{cpi} - \bar{v}_{cперi})$  – вектор-стовпець, що визначає результуючий сигнал цілі на виході прийомних каналів ЦЛАР.

З урахуванням (1) і співвідношень, що визначають вектор-стовпці  $\bar{v}_{cпр}$ ,  $\bar{v}_{cпер}$ ,  $v_1$  і  $v_2$ , можна показати, що:

$$z_1 = u_{npl} (Pr_{10} \cdot \bar{v}_{cпр})^H \cdot \bar{v}_1(\epsilon_{er}) = u_{npl} (d_{1a} - d_{1b} d_{12}) \cdot e^{j \frac{N-1}{2} \pi (\sin \epsilon_{er} - \sin \epsilon_u)}, \quad (3)$$

$$z_2 = u_{npl} \cdot (Pr_{10} \cdot s_2)^H \cdot \bar{v}_1(\epsilon_{er}) = u_{npl} \cdot (d_{1b} - d_{1a} d_{12}) \cdot e^{j \left( \frac{N-1}{2} (\sin \epsilon_{er} + \sin \epsilon_u) - \frac{4h_{max}}{\lambda} \pi \sin \epsilon_u \right)}, \quad (4)$$

де  $d_{1b} = \sin[0,5N\pi(\sin \epsilon_{er} + \sin \epsilon_u)] / N \sin[0,5\pi(\sin \epsilon_{er} + \sin \epsilon_u)]$ .

З урахуванням співвідношень (3) і (4) можна знайти залежність потужності результуючого сигналу  $p_{1p}$  на виході корелятора в схемі на рис. 1 від еталонного кута місця  $\epsilon_{er}$ :

$$p_{1p}(\epsilon_{er}) = (d_{1a} - d_{12} d_{1b})^2 + (d_{1b} - d_{21} d_{1a})^2 - 2(d_{1a} - d_{12} d_{1b}) \cdot (d_{1b} - d_{12} d_{1a}) \cos \Delta\psi, \quad (5)$$

де  $\Delta\psi$  визначається виразом:  $\Delta\psi = [(N-1) - 4h_{max}/\lambda] \cdot \pi \cdot \sin \epsilon_u$ .

Співвідношення (5) і визначає пеленгаційну характеристику пристрою, схема якого представлена на рис. 1.

Якщо врахувати, що  $|d_{2a}| = |d_{1b}|$ , то можна помітити, що структура співвідношення (5) у значній мірі нагадує структуру чисельника виразу

$$A_1(\varepsilon_{\text{ст}}) = \frac{q_1 \cdot N^2 (d_{1a}^2 + d_{2a}^2 - 2d_{1a} \cdot d_{2a} \cdot \cos \Delta \psi)}{1 + 2N \cdot q_1 \cdot (1 - d_{12} \cdot \cos \Delta \psi)},$$

що визначає пеленгаційну характеристику

алгоритму Кейпона з тією лише різницею, що коефіцієнти  $d_{1a}$  і  $d_{2a}$ , замінені відповідно на коефіцієнти  $(d_{1a} - d_{12}d_{1b})$  і  $(d_{1b} - d_{21}d_{1a})$ . Останні, по суті справи, являють собою амплітудні ДС системи “ЦЛАР + матричний фільтр  $Pr_{\text{іпро}}$ ” відповідно для прямого й перевідбитого від Землі сигналів цілі. Заміна коефіцієнта  $d_{1a}$ , що описує амплітудну ДС антенної решітки для прямого сигналу, на коефіцієнт  $(d_{1a} - d_{12}d_{1b})$  означає, що при включенні в систему обробки сигналів матричного фільтра з характеристикою  $Pr_{\text{іоб}}$  формування провалу в результируючій ДС антеною системи РЛС у напрямку на “антипод” цілі супроводжується ослабленням прямого сигналу й перекручуванням форми ДС ЦЛАР для прямого сигналу цілі. Останнє приводить до невідавкового зсуву оцінки кута місця МВЦ при використанні для виміру кута місця МВЦ пристрою, схема якого представлена на рис. 1. Це означає, що варто вживати спеціальних заходів для усунення цього зсуву або його урахування. Цей висновок підтверджується результатами чисельного розрахунку функціональної залежності  $p_{1p}(\varepsilon_{\text{ст}})$ , представленої на рис. 2 для  $N = 200$ ,  $\lambda = 5$  см.

Характеристика, зображена на рисунку суцільною лінією, відповідає куту місця цілі  $\varepsilon_{\text{ц}} = 0.3\varepsilon_{0.5P}$ , а залежність, зображена пунктирною лінією,  $\varepsilon_{\text{ц}} = 0.2\varepsilon_{0.5P}$ .

Усунення зсуву оцінки кута місця МВЦ при використанні ПРФ принципово можлива, наприклад, за рахунок переходу до фазометричного методу оцінки кута місця МВЦ. У цьому випадку прийомна ЦЛАР повинна бути розділена на дві підрешітки, вихідні сигнали яких обробляються роздільно у відповідності зі схемою на рис. 1.

Так як кут місця МВЦ априорі невідомий, то замість одного матричного фільтра, що перебудовується, у схемі на рис. 1 варто використовувати набір ПРФ і кореляторів з фіксованим налаштуванням.

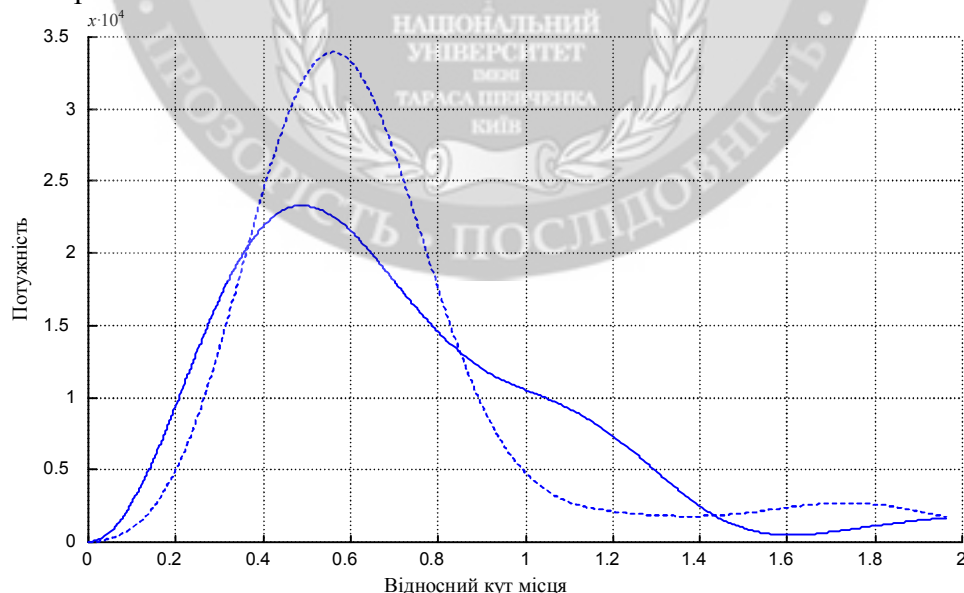


Рис. 2. Пеленгаційна характеристика ПРФ

Структурна схема фазометричного вимірювача кута місця МВЦ, реалізованого на основі схеми на рис. 1, представлена на рис. 3. Відносний фазовий зсув сигналів  $\Delta \varphi$  у схемі на рис. 3 вимірюється сумарно-різницевим методом:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{u_2 - u_1}{j \cdot (u_2 + u_1)} \right),$$

а за оцінку  $\varepsilon_{\text{ц}}^*$  кута місця МВЦ приймається значення кута місця, для якого виконується умова:

$$\varepsilon_{\text{ц}}^* = \arg \min |\varepsilon_{\text{р}} - \varepsilon_{\text{ст}}|,$$

де  $\varepsilon_{\text{р}}$  – значення кута місця, розраховане за результатами виміру  $\Delta\varphi$

$$\varepsilon_{\text{р}} = \arcsin \left( \frac{2 \cdot \Delta\varphi}{N \cdot \pi} \right).$$

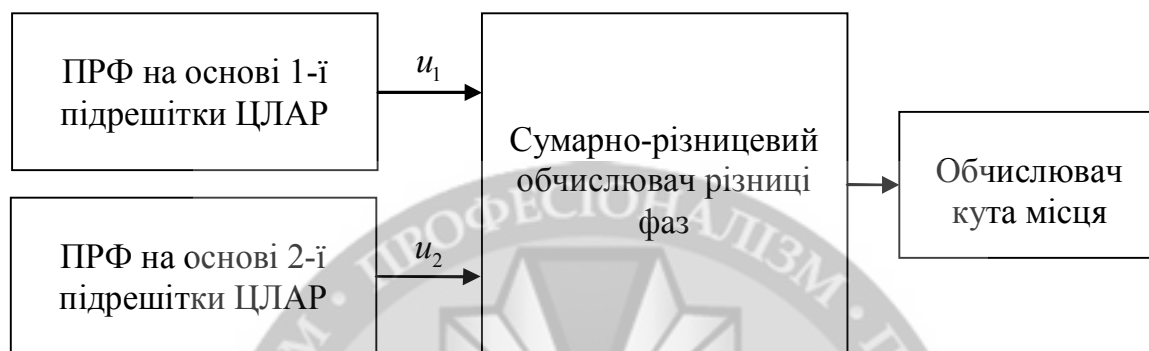


Рис. 3. Моноімпульсний вимірювач кута місця на основі ПРФ

При заміні перестроюваного ПРФ набором фільтрів кількість паралельно включених ПРФ визначається інтервалом вимірюваних кутів місця цілі й заданою точністю виміру кута місця. Середня квадратична помилка виміру кута місця цілі при цьому буде визначатися виразом (без урахування дискретності налаштування ПРФ):

$$\sigma_{\varepsilon} \approx \frac{2 \cdot \lambda}{\pi L_{\text{ЦЛАР}} \cdot \sqrt{N \cdot q_1 (1 - R_{01}^2)}}, \quad (6)$$

де  $L_{\text{ЦЛАР}}$  – лінійний розмір ЦЛАР;  $R_{01} = \sin(0,5N \cdot \pi \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}}) / 0,5N \cdot \sin(\pi \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}})$ .

Так як в РЛС РТВ вимір кута місця проводиться, насамперед, з метою визначення висоти польоту цілі, то для наочної ілюстрації можливостей і умов застосування методу оцінки кута місця МВЦ, реалізованого на основі ПРФ, на рис. 4 представлена залежність складової відносно середньої квадратичної помилки визначення висоти цілі  $\sigma_{\text{н}}/H$ , обумовленої помилкою виміру кута місця, від висоти польоту цілі щодо поверхні Землі. Відношення сигнал/шум у кожному прийомному каналі 200-елементної ЛАР прийняте рівним 0 дБ (залежність 1) і 9,5дБ (залежність 2). Дальність до цілі прийнята рівною 100 км, висота підйому нижнього елемента ЛАР  $h_{\text{н}} = 15$  м. При зазначених вихідних даних ціль з'являється над горизонтом при висоті польоту, що перевищує 420 м.

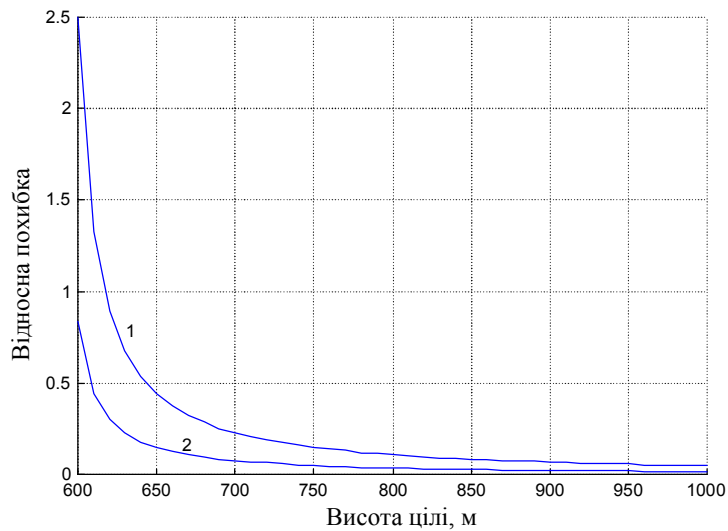


Рис. 4. Залежність відносної помилки визначення висоти МВЦ від висоти польоту цілі при використанні ПРФ

На рис. 5 представлена залежність відношення сигнал/шум на входах вимірювача різниці фаз (без урахування пасивної перешкоди) у схемі на рис. 3 при  $q_1 = 0$  дБ,  $N_1 = 100$ .

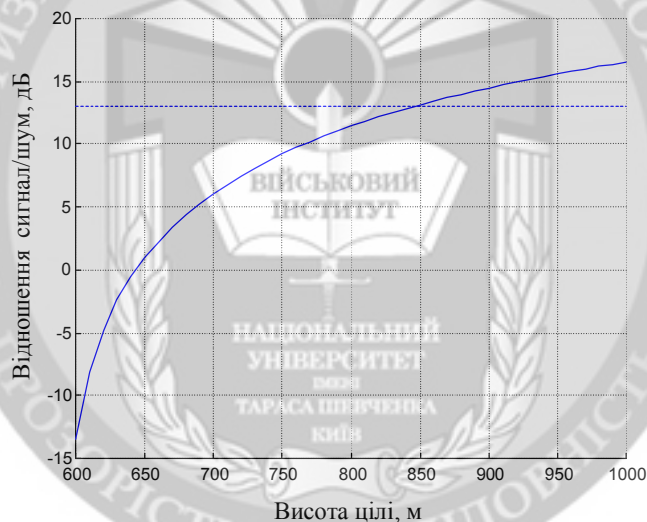


Рис. 5. Відношення сигнал/шум на входах вимірювача різниці фаз

На цьому ж рисунку пунктирною лінією показаний поріг виявлення сигналів відповідної імовірності помилкової тривоги, що дорівнює  $10^{-6}$ .

З рис. 4–5 видно, що при дальності до цілі порядку 100 км і висоті її польоту, що перевищує 700 м, визначення висоти методом, заснованим на застосуванні ПРФ, з відносною помилкою, що не перевищує 6%, можливо тільки при  $q_1 = 12$  дБ. При одночасній кутовій селекції перевідбитого від Землі сигналу цілі й пасивної перешкоди необхідний запас у відношенні сигнал/шум різко зростає. Так, наприклад, при дальності до цілі 100 км і висоті її польоту понад 700 м для забезпечення відносної помилки виміру висоти, що не перевищує 6%, відношення сигнал/шум в одному прийомному каналі ЦІАР повинне бути більше 40 дБ. Тому, для придушення пасивних перешкод при використанні методу виміру кута місця на основі ПРФ, доцільно використовувати звичайну систему СДЦ, включену в кожний з підканалів до вимірювача різниці фаз сигналів.

При одночасній кутовій селекції перевідбитого від Землі сигналу цілі й пасивної перешкоди для розрахунку СКО виміру кута місця цілі замість виразу (6) варто використати

співвідношення:

$$\sigma_{\varepsilon}(\varepsilon_{\text{ц}}) \approx \frac{2 \cdot \lambda}{\pi L_{\text{АР}} \cdot \sqrt{2N \cdot q_1(1-r_{\varepsilon}^2)}},$$

де  $r_{\varepsilon}^2$  – визначається співвідношенням:  $r_{\varepsilon}^2 = \frac{r_{01}^2 + r_{02}^2 - 2r_{01} \cdot r_{02} \cdot r_{12}}{1 - r_{12}^2}$ , з урахуванням того,

що число прийомних елементів у кожній з підрешіток ЦЛАР дорівнює  $N/2$ .

**Висновок.** Запропоновано метод виміру кута місця МВЦ на основі режекторного просторового фільтра, практична реалізація якого дозволить суттєво підвищити зони огляду РЛС виявлення МВЦ, в межах яких одночасно можуть бути визначені всі три координати цілі.

**Рецензент:** к.т.н., доц. Долгушин В.В., старший науковий співробітник науково-дослідного центру, Військовий інститут, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

к.т.н. Мірошніченко О.В.

### МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА МЕСТА ЦЕЛИ В РЛС МАЛОВЫСОТНЫХ ЦЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФИЛЬТРОВ

*В радиолокационной станции обнаружения маловысотных целей для оценки направления прихода прямого сигнала цели формирования провала должно осуществляться в направлении на участок поверхности Земли, что является источником переотраженного сигнала. Для формирования провала в диаграмме направленности РЛС выявление маловысотных целей в статье предложено использовать пространственнорежекторный фильтр, реализованный на основе цифровой линейной антенной решетки перестраиваемого матричного фильтра.*

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, маловысотная цель, пространственнорежекторный фильтр, диаграмма направленности, цифровая линейная антенная решетка.

Ph.D. Miroshnichenko O.

### METHODS OF MEASUREMENT OBJECTIVES CORNER SPOT IN THE LOW-ALTITUDE SYSTEMS RADYOLOKATSYONNYH PURPOSES ON THE BASIS OF SPATIAL FYLTROV

*In radar detecting low-altitude targets to assess the direction of arrival of the direct sound the purpose of forming the failure must be in the direction of the surface area of the Earth, which is the source Backlight signal. For the formation of a dip in the radar antenna pattern malovisotnih identification purposes in the article proposed to use prostranstvenorezhektorny filter implemented on the basis of digital linear array matrix tunable filter.*

**Keywords:** radar, low-altitude target, space-cut filter, the radiation pattern, digital linear array antenna.