

УДК 621.396.969

¹В.П. Харченко, д.т.н., проф.
²А.Г. Сорочан, к.т.н.

РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ МЕТОДУ ПЕЛЕНГАЦІЇ НА ОСНОВІ J-КОРЕЛЯЦІЙНОГО ОБРОБЛЕННЯ

¹Національний авіаційний університет
 E-mail: nauka@nau.edu.ua

²Донецький національний технічний університет
 E-mail: sorochan_kpm@mail.ru

Проведено аналіз роздільної здатності J-кореляційного методу пеленгації. Отримано вирази, що визначають середньоквадратичні відхилення різниці часових затримок сигналів, викликані кутковими розходженнями між напрямками на дві рівновіддалені цілі.

The analysis of the resolution of the J-correlation method of direction finding. The expressions defining the standard deviations of the difference of time delays of signals caused by the angular divergence between the directions of two equidistant targets.

Проведен анализ разрешающей способности J-корреляционного метода пеленгации. Получены выражения, определяющие среднеквадратические отклонения разности временных задержек сигналов, вызванной угловым расхождением между направлениями на две равноудаленные цели.

Постановка проблеми

Кореляційний метод пеленгації на основі J-кореляційного оброблення сигналів докладно розглянуто у роботах [1–4].

У роботах [2; 3] розкрито особливості методу пеленгації.

У роботі визначено [4] точність вимірювання відносної часової затримки прийнятих сигналів, різні характеристики пристроїв, що реалізують цей метод.

Важливим параметром пеленгаторів є роздільна здатність, яка залишилася за рамками зазначених робіт.

Мета роботи – зробити оцінку роздільної здатності методу пеленгації на основі J-кореляційного оброблення сигналу.

Дослідження роздільної здатності

Пеленгатор складається з таких елементів (рис. 1):

- першої та другої антени Ан.1 та Ан.2;
- підсилювачів високої частоти ПВЧ;
- регульованої РЛЗ та фіксованої ФЛЗ ліній затримок, часові затримки яких відповідно, θ_x та θ_0 ;
- змішувача ЗМ;

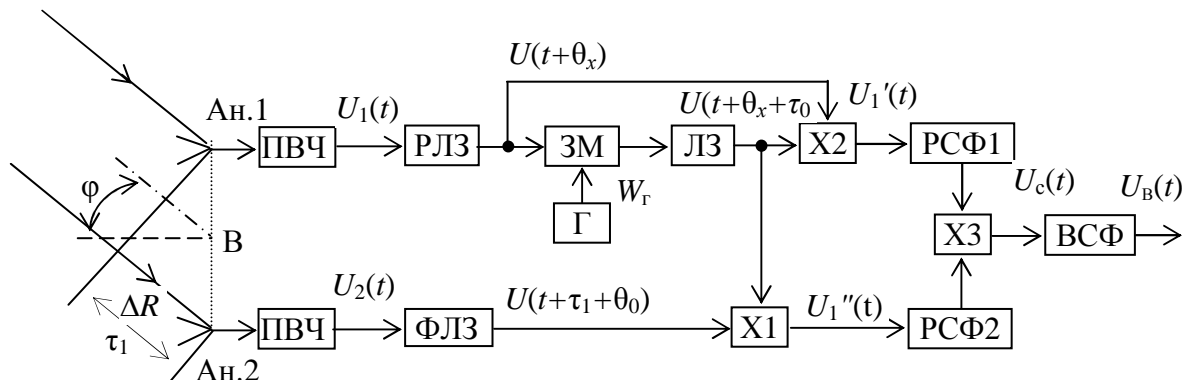


Рис.1. Структурна схема пеленгатора, реалізованого за методом J-кореляційного оброблення сигналу

- кварцового генератору Γ з частотою W_r ;
- лінії затримки ЛЗ на час τ_0 ;
- першого, другого, третього перемножників X1, X2, X3;
- першого та другого режекторно-смугових фільтрів РСФ1 та РСФ2;
- вузькополосного смугового фільтру ВСФ.

Для оцінювання роздільної здатності пеленгатора будемо вважати, що в просторі розташовані дві точкові нерухомі цілі, які рівновіддалені від РЛЗ і відстають одна від одного за азимутом на деякий кут $\Delta\alpha$.

Зондуючим сигналом є сигнал з кутовою модуляцією, що описується виразом

$$U(t) = U \cos[W_c t + \beta \sin(\Omega t) + \varphi_0],$$

де U – амплітуда сигналу;

W_c – несуча частота;

β – індекс модуляції сигналу;

Ω – частота модулюючої напруги;

φ_0 – початкова фаза зондуючого сигналу.

У ряді робіт проводиться статистичний аналіз пеленгатором у випадку дії на його входах адитивної суміші сигналу та шумового напруження.

Сигнальна складова кожного каналу є сумою відбитого від двох цілей зондуючого сигналу.

Шумові напруження, що супроводжують вхідні сигнали кожного каналу, характеризуються як незалежні, з рівномірним законом розподілу і рівними дисперсіями.

У результаті проведеного аналізу напруження на виході ВСФ було визначено у вигляді

$$U_B(t, \tau_1, \tau_2, \theta_x) = U_{0c} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta_1'') \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta') \times \right. \\ \left. \times \cos[2W_r t + n(\varphi_1 + \varphi_2) + \varphi_1' + \varphi_2'] + \right.$$

$$\left. + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta_1'') \sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta') \cos[2W_r t + n(\varphi_1 + \varphi_2) + \varphi_1' + \varphi_2'] \right\} + \\ + U_{0c} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta_2'') \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta') \cos[2W_r t + n(\varphi_1 + \varphi_2) + \varphi_1' + \varphi_2'] + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta_2'') \sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta') \cos[2W_r t + n(\varphi_1 + \varphi_2) + \varphi_1' + \varphi_2'] \right\} + \\ + u_{шв}(t) = U_{c1}(t, \theta_x, \tau_1) + U_{c2}(t, \theta_x, \tau_2) + u_{шв}(t),$$

де τ_1 та $\tau_2 = \tau_1 + \Delta\tau$ – відносні просторові часові затримки сигналів, що діють на входах антен Ан.1 та Ан.2;

$\Delta\tau$ – приріст просторової часової затримки, викликаній відхиленням однієї з цілей за азимутом на деякий кут $\Delta\alpha$;

U_{0c} – амплітуда вихідного сигналу:

$$U_{0c} = 0,25U_0^4;$$

$J_n(\beta)$ – функція Беселя n -го порядку від аргументу β ;

β – індекс модуляції зондуючого сигналу;

β' – індекс модуляції сигналу на виході опорного каналу (вихід X2):

$$\beta' = 2\beta \sin(0,5\Omega\tau_0);$$

β_1'' , β_2'' – індекси модуляції сигналів на виході регульованого каналу (вихід X1), отриманих від першої β_1'' та другої β_2'' цілей:

$$\beta_1'' = 2\beta \sin[0,5\Omega(\tau_1 + \theta_0 - \theta_x - \tau_0)] \approx \\ \approx 2\beta \sin(0,5\Omega\tau_{отн});$$

$$\beta_2'' = 2\beta \sin[0,5\Omega(\tau_2 + \theta_0 - \theta_x - \tau_0)] \approx \\ \approx 2\beta \sin[0,5\Omega(\tau_{отн} + \Delta\tau)];$$

$U_{c1}(t, \theta_x, \tau_1)$ и $U_{c2}(t, \theta_x, \tau_2)$ – сигнальні складові вихідного напруження, що формуються сигналами, відбитими від двох цілей.

Шумове напруження $u_{шв}(t)$ визначено кореляційною функцією:

$$K_{шв}(\tau) = \sigma_{шв}^2 \frac{\sin(\Delta\Omega\tau)}{(\Delta\Omega\tau)} \cos(2W_r\tau),$$

$$\sigma_{шв}^2 = \left\{ 0,5U_0^4\sigma_{ш}^4 \left[1 + 0,75 \frac{U_0^2}{\sigma_{ш}^2} \right] + \right.$$

$$\left. + \sigma_{ш}^8 \left[1 + 1,75 \frac{U_0^2}{\sigma_{ш}^2} + 0,75 \frac{U_0^4}{\sigma_{ш}^4} \right] \right\} \frac{\Delta\Omega}{(2\Delta W_{c1})}, \quad (1)$$

де $\sigma_{шв}^2$ – дисперсія шумового напруження;

$\sigma_{ш}^2$ – дисперсія шуму, наведеного до входу приймача;

U_0 – амплітуда сигналу, що діє на вході приймача;

$\Delta\Omega$ – смуга пропускання ВСФ;

ΔW_{c1} – ширина спектру сигналу на виході

РСФ1 опорного каналу.

У виразі $U_b(t, \tau_1, \tau_2, \theta_x)$, що описує вихідну напругу ВСФ, вирази вигляду

$\sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta_1'') \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta')$ являють собою згортку

спектральних складових нижньої бічної вихідного сигналу РСФ2 у регульованому каналі з верхньою бічною вихідного сигналу РСФ1 опорного каналу.

Результат згортки формується на частоті $2W_r$. Вираз $\sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta_1'') \sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta')$ формує згортку на тій же частоті $2W_r$, як результат перемноження спектральних складових верхньої бічної вихідного сигналу РСФ2 регульованого каналу зі спектральними складовими нижньої бічної вихідного сигналу РСФ1 опорного каналу.

Результат згортки являє собою гармонійне коливання, амплітуда якого залежить від відносної часової затримки сигналів $\tau_{отн}$, що діють на вході третього перемножника ХЗ.

Час $\tau_{отн}$ визначається положенням цілі в просторі та може встановлюватися зміною часової затримки θ_x в РЛЗ.

Обвідну сигналу згортки як функцію $\tau_{отн}$ (т.е. τ_1 или θ_x) подамо у вигляді

$$U_c(\theta_x, \tau_1, \tau_2) = U_{c1}(\theta_x, \tau_1) + U_{c2}(\theta_x, \tau_2) =$$

$$= U_{0c} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta_1'') \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta') + \right.$$

$$\left. + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta_1'') \sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta') \right\} +$$

$$+ U_{0c} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta_2'') \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta') + \right.$$

$$\left. + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta_2'') \sum_{n=-\infty}^{-1} J_n(\beta') \right\}.$$

З урахуванням того, що для функцій Бесселя справедливо $J_{-n}(\beta) = J_n(\beta)$, обвідну вихідного сигналу визначають за формулою

$$U_c = 2U_{0c} \left[\sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta_1'') + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta_2'') \right] \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta').$$

Залежність відносного рівня обвідного сигналу на виході аналізуючого пристрою від зміни часової затримки θ_x' ($\theta_x' = \theta_x + \tau_0 - \theta_0$) в РЛЗ показано на рис. 2.

Збільшення просторової часової затримки $\Delta\tau$ спричинено відхиленням другої цілі за азимутом на деякий кут $\Delta\alpha$, тобто

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1.$$

Згідно з визначенням роздільна здатність за кутовою координатою (у розглянутому випадку за азимутом) це мінімальна різниця кутів $\Delta\alpha_{\min}$ між напрямками на дві рівновіддалені відносно радіолокаційної станції цілі, під час якої ще можливо роздільне спостереження сигналів від цих цілей.

Згідно з аналізованим методом пеленгації можна визначити відносну часову затримку сигналів на входах антен. Виходячи з визначення, необхідно встановити взаємозв'язок між кутовим положенням цілі і відносною часовою затримкою сигналів.

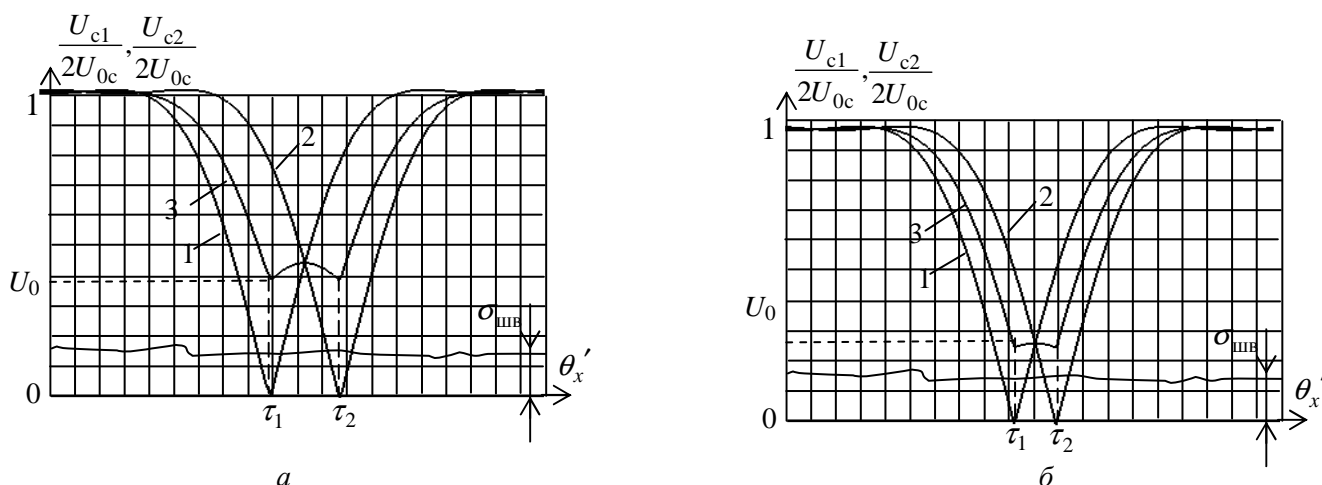


Рис. 2. Залежність відносного рівня об'єднаного сигналу від зміни часової затримки:

a – $\Delta\tau = \Delta\tau_1 > \Delta\tau_2$;

б – $\Delta\tau_2$;

1 – відносна зміна вихідного напруження для першої цілі U_{c1} ;

2 – відносна зміна вихідного напруження для другої цілі U_{c2} ;

3 – результуючий сигнал $U_{c1} + U_{c2}$

Якщо відстань між антенами ненапрявленої дії дорівнює B (рис. 1), пеленгована ціль віддалена від центру бази на відстань $R \gg B$, а кут φ – це кут між напрямом на ціль і нормаллю до бази, що проходить через її середину, то напрямом надходження відбитого сигналу φ пеленг цілі як функцію різницевої часової затримки сигналів τ_1 можна визначити з рис. 1 за таким співвідношенням

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\Delta R}{B}\right) = \arcsin\left(\frac{\tau_1 c}{B}\right),$$

де c – швидкість поширення радіохвилі у вільному просторі.

Відносна часова затримка прийнятих антенами коливань, спричинена відмінностями часу поширення радіохвилей від цілі до антен, буде

$$\tau_1 = \frac{B}{c} \sin \varphi = \tau_{\max} \sin \varphi, \quad (2)$$

де $\tau_{\max} = \frac{B}{c}$ – максимальне значення різницевої часової затримки сигналів, що діють на входах антен.

З рівності (2) випливає, що лінійна залежність між часовим зсувом τ_1 та кутовим положенням цілі φ буде визначено у разі невеликих відхилень цілі від рівносигнального напрямку. Тому роздільну здатність пеленгатора визначимо під час розташування цілей у безпосередній близькості до рівносигнального напрямку.

У режимі роботи станції, близькому до вимірювання кутового положення цілей, тобто в межах значень затримки в РЛЗ $\tau_1 \leq \theta_x' \leq \tau_2$, індекси модуляції β_1'' і β_2'' будуть меншими за 0,5. Тому в складі спектра сигналів регульованого каналу будуть тільки складові першого порядку $J_1(\beta_1'')$ і $J_1(\beta_2'')$ з рівнями, пропорційними відповідним індексам модуляції.

Отже, результат згортки спектральних складових регульованого й опорного каналів, що формуються на виході ВСФ на частоті $2W_r$, буде визначатися тільки функціями Бесселя першого порядку. Тому у зазначених межах змін затримки РЛЗ сигнальна складова вихідної напруги визначиться виразом

$$U_c = 2U_{0c} [J_1(\beta'_1) + J_1(\beta'_2)] J_1(\beta').$$

Крім цього за індексів модуляції $\beta \leq 0,5$ значення функцій Беселя $J_1(\beta) \approx 0,5\beta$, отже:

$$\begin{aligned} U_c &= U_{0c} 2 [J_1(\beta'_1) + J_1(\beta'_2)] J_1(\beta') = \\ &= U_{0c} J_1(\beta') \beta \Omega \Delta \tau. \end{aligned} \quad (3)$$

Оскільки кількість спектральних складових опорного каналу та їх рівень не залежать від місцеперебування цілі, оскільки вона визначається індексом модуляції $\beta' = \text{const}$, то і $J_n(\beta') = \text{const}$. Тоді згідно з отриманим виразом (3) рівень сигнальної складової на ділянці зміни часових затримок у РЛЗ $\tau_1 \leq \theta'_x \leq \tau_2$ за малих різниць $\tau_2 - \tau_1 = \Delta \tau$, пропорційний $\Delta \tau$.

Залежності відносного рівня вихідної напруги як функції часової затримки θ_x в РЛЗ для двох об'єктів показано на рис. 2.

Зміна рівня сигналу U_c може бути спричинена дією шумового напруження або зміною місцеположення однією з цілей. Зміну вихідного напруження, зумовлену дією шуму, позначимо $\Delta U_{ш1}$, що дорівнюватиме $\sigma_{шв}$:

$$\Delta U_{ш1} = \sigma_{шв}.$$

Зміну вихідного напруження, що спричинена відхиленням просторової часової затримки на величину $\Delta \tau'$ за рахунок зміни кутового положення однією з цілей, позначимо ΔU_c , яке визначиться з формули (3):

$$\Delta U_c = U_{0c} J_1(\beta') \beta \Omega \Delta \tau'.$$

Кількісною оцінкою роздільної здатності за азимутом будемо вважати середньоквадратичне відхилення $\sigma_{\Delta \tau}$ мінімальної різниці просторових часових затримок сигналів, спричиненою різницею кутів між напрямом на дві рівновіддалені цілі.

З умов перевищення вихідним напруженням рівня шумового напруження вдвічі визначається $\sigma_{\Delta \tau}$, тобто $\Delta U_c = \sigma_{шв}$.

Отже, середньоквадратична помилка вимірювання різниці просторової часової затримки в результаті дії шумового напруження має вигляд

$$\Delta \tau' = \frac{\sigma_{шв}}{U_{0c} J_1(\beta') \beta \Omega}. \quad (4)$$

Оскільки потужність шумового напруження на виході пристрою, що визначається дисперсією $\sigma_{шв}^2$ (1), залежить від вихідного відношення сигнал/шум, тоді необхідно розглянути два випадки:

- відношення сигнал/шум менше за одиницю;
- відношення сигнал/шум більше за одиницю.

У разі відношення сигнал/шум на вході пристрою менше за одиницю середньоквадратичне відхилення шумового напруження на його виході можна записати, використовуючи рівняння (1) у вигляді

$$\sigma_{шв} = \sigma_{ш}^4 \sqrt{\frac{\Delta \Omega}{2 \Delta W_{c1}}}.$$

Тоді з формули (3) середньоквадратичне відхилення різниці часової затримки сигналів визначається у вигляді

$$\begin{aligned} \sigma'_{\Delta \tau} &= \frac{\sigma_{шв}}{U_{0c} J_1(\beta') \beta \Omega} = \\ &= \frac{2 \sqrt{2}}{\left(\frac{U_0}{\sigma_{ш}}\right)^4 J_1(\beta') \beta \Omega} \sqrt{\frac{\Delta \Omega}{\Delta W_{c1}}}. \end{aligned}$$

У разі відношення сигнал/шум на вході пристрою більше за одиницю середньоквадратичне відхилення шумового напруження на виході визначиться з виразу (1):

$$\sigma_{шв} = 0,6 U_0^3 \sigma_{ш} \sqrt{\frac{\Delta \Omega}{\Delta W_{c1}}}.$$

Тоді з формули (4) середньоквадратичне відхилення різниці часової затримки сигналів визначається як

$$\sigma''_{\Delta\tau} = \frac{\sigma_{шв}}{U_{0c} J_1(\beta') \beta \Omega} =$$

$$= \frac{2,4}{\left(\frac{U_0}{\sigma_{ш}}\right) J_1(\beta') \beta \Omega} \sqrt{\frac{\Delta\Omega}{\Delta W_{c1}}}$$

Роздільна здатність J -кореляційного методу пеленгації залежить від вхідного відношення сигнал/шум. У разі вхідного відношення сигнал/шум більше за одиницю метод володіє найкращою роздільною здатністю.

Висновки

Уперше для кореляційного методу пеленгації на основі J -кореляційного оброблення виконано аналіз роздільної здатності, яка оцінюється середньоквадратичним відхиленням різницевої часової затримки вхідних сигналів, що визначається кутовим відхиленням між двома цілями.

Роздільна здатність пеленгатора залежить від кутового положення цілі та вхідного відношення сигнал/шум.

Показано, що у разі вихідного відношення сигнал/шум більше за одиницю метод забезпечує мінімальне середньоквадратичне відхилення, яке обернено пропорційне відношенню сигнал/шум і добутку індексу модуляції зондуючого сигналу на модулюючу частоту.

Література

1. Патент 42067 Україна, G01S 3/00. Спосіб вимірювання відносної часової затримки сигналу з кутовою модуляцією при його проходженні роздільними каналами розповсюдження і пристрій для його здійснення / А.Г. Сорочан, С.М. Лігінов, В.І. Литвиненко. – № 97125743; заявл. 01.12.1997; опубл. 15.10.1997, Бюл. № 9.
2. Сорочан А.Г. J -корреляционный метод пеленгации / А.Г. Сорочан // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2001. – №11. – С.57 – 65.
3. Сорочан А.Г. Второй способ J -корреляционного метода пеленгации / А.Г. Сорочан // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2003. – № 10. – С.53 – 60.
4. Сорочан А.Г. Эффективность измерения временной задержки J -корреляционного метода пеленгации / А.Г. Сорочан // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 1/2 (13) – С. 64 – 67.

Стаття надійшла до редакції 22.09.10.