

В.В. Ципоренко, аспір.

Житомирський державний технологічний університет

**ПОХИБКА КОМПЕНСАЦІЇ КОРЕЛЯЦІЙНОГО РАДІОПЕЛЕНГАТОРА  
З ОБРОБКОЮ РАДІОСИГНАЛУ НА ПРОМІЖНІЙ ЧАСТОТІ***(Представлено д.т.н., проф. Манойловим В.П.)*

*Виконано аналіз особливостей кореляційного методу визначення напрямку на джерело радіовипромінювання, що використовує компенсаційний часовий аналіз прийнятих радіосигналів на проміжній частоті. Отримана оцінка похибки компенсації кореляційного пеленгатора, та показано, що вона зумовлюється специфічними фазовими спотвореннями, також визначені її основні характеристики в залежності від параметрів радіосигналу та радіопеленгатора. Показано, що при великому відношенні сигнал/шум похибка компенсації кореляційного пеленгатора може сягати  $\pi$  радіан і суттєво впливати на загальну похибку пеленгування.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Сучасний стан розвитку радіоелектроніки характеризується широким застосуванням високоточних радіонавігаційних систем і в першу чергу глобальних супутникових систем, що функціонують в складній електромагнітній обстановці. Основними операціями аналізу радіовипромінювань в радіонавігаційних системах є безпосереднє радіопеленгування або визначення часу затримки чи різниці початкових фаз радіосигналів [1, 2, 3, 4]. Перспективним напрямком реалізації операцій обробки радіонавігаційних систем є використання кореляційного аналізу, що забезпечує високу заводо захищеність в складній електромагнітній обстановці і умовах апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань [3, 4, 5].

Точність реалізації обробки радіосигналів безпосередньо впливає на точність радіонавігаційної системи, а також ефективність її функціонування в цілому [1, 4]. Тому аналіз точності обробки радіосигналів в радіонавігаційних системах в складній електромагнітній обстановці є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми.** В роботі [1] виконано аналіз побудови радіонавігаційних систем та пристроїв, а також їх точнісних характеристик. Показано, що в складній електромагнітній обстановці високу ефективність аналізу радіосигналів забезпечує кореляційна обробка. Визначені також основні принципи побудови кореляційних радіонавігаційних пристроїв та досліджені основні фактори, що впливають на їх точність, в тому числі неідентичність параметрів каналів. Однак точнісний аналіз в даній роботі виконано для умов визначеності параметрів радіосигналів і при апіорній невизначеності є недостатньо ефективним.

В роботах [6, 7] виконано аналіз точнісних характеристик кореляційних радіопеленгаторів та часових аналізаторів з урахуванням впливу власних шумів приймальних радіоканалів. Але залежність точності кореляційного аналізу від параметрів радіоканалів в цих роботах розглянуто недостатньо.

В роботі [2] виконано аналіз точнісних характеристик кореляційних пасивних радіопеленгаторів та систем визначення напрямку на джерело радіовипромінювання з урахуванням характеристик окремих елементів радіоканалів, таких як підсилювачі та фільтри. Однак в цій роботі не досліджено вплив на точність аналізу попереднього перетворення частоти радіосигналів, а також особливостей умов невизначеності.

В роботі [3] досліджені питання побудови радіопеленгаторів та кореляційних пристроїв пасивної радіолокації та їх точнісних характеристик в умовах невизначеності щодо дальності до джерела випромінювання. Для цих умов отримані залежності потенційної точності кореляційних систем радіолокації. Однак в роботі не досліджено вплив на точність кореляційного аналізу умов невизначеності щодо параметрів випромінювань та попередньої їх лінійної обробки в радіоканалах.

В роботі [4] досліджені точнісні характеристики радіонавігаційних систем, що використовують радіопеленгаційний та інтерферометричний методи просторового аналізу. Визначені основні фактори, що обмежують точність кутомірних систем, в тому числі власні шуми, особливості розповсюдження випромінювання в атмосфері та похибка визначення координат споживача. Але виконаний аналіз в роботі не враховує в достатній мірі структуру побудови радіоприймальних каналів та умов невизначеності щодо параметрів випромінювань, що знижує загальну точність аналізу.

В роботі [8] виконано аналіз точності кореляційного пеленгування із обробкою радіосигналу на проміжній частоті для умов апіорної невизначеності щодо параметрів випромінювань. Для цих умов отримані залежності потенційної точності пеленгування в залежності від параметрів каналів

пеленгування. Однак в роботі не досліджено вплив на точність пеленгування частотних та фазових перетворень, що виникають при попередній обробці радіосигналу та подальшому його кореляційному аналізу.

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.** Таким чином, невіршеною раніше частиною загальної проблеми аналізу точності кореляційних навігаційних пристроїв є аналіз залежності точності кореляційної часової обробки радіосигналів від попередніх їх частотних та фазових перетворень. В першу чергу вказана задача є актуальною для пристроїв, що здійснюють кореляційний компенсаційний аналіз на проміжній частоті в умовах апріорної невизначеності щодо форми радіосигналу.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Відповідно до невіршених раніше частин загальної проблеми точнісного аналізу кореляційних радіонавігаційних пристроїв, цілями статті є: дослідження особливостей кореляційної обробки радіосигналів при попередньому перетворенні їх за частотою в приймальних радіоканалах; дослідження впливу на точність компенсаційної кореляційної обробки радіосигналів в радіонавігаційних пристроях умов апріорної невизначеності щодо їх частоти; дослідження залежності точності кореляційної обробки радіосигналів на проміжній частоті від параметрів каналів радіоприйому радіонавігаційного пристрою.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Нехай необхідно визначити напрямком на джерело радіовипромінювання методом кореляційного часового радіопеленгування з використанням двох рознесених у просторі пеленгаційних каналів та компенсаційного методу вимірювання затримки [1, 2]. При цьому приймальні радіоканали мають ідентичні характеристики і побудовані як супергетеродинні радіоприймачі з одним перетворенням частоти. Для вказаного методу вимірювання затримка прийому радіосигналу  $S(t)$  між приймальними радіоканалами визначається по максимуму взаємно кореляційної функції їх вихідних радіосигналів на проміжній частоті, який знаходиться шляхом регулювання компенсаційної затримки в одному із каналів. Взаємно кореляційна функція радіосигналів визначається на проміжній частоті, тому пристрій в цілому відноситься до класу Н [1].

Нехай обробка радіосигналу  $S(t)$  здійснюється за умови великого відношення сигнал/шум, без врахування інструментальних похибок та відсутності нелінійних спотворень. Сам радіосигнал  $S(t)$  представляє собою неперервне випромінювання з незмінною середньою потужністю, що приймається в межах смуги частот  $\{\omega_n, \omega_e\}$ , яка відповідає смузі пропускання приймальних радіоканалів та випадковим розподілом спектральної густини потужності в межах смуги пропускання:

$$S(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_s t + \varphi(t) + \varphi_0), \quad (1)$$

де  $A(t), \varphi(t), \varphi_0$  – відповідно миттєві значення амплітуди, кутової модуляції та початкової фази;

$$\omega_s = \{(\omega_n + \omega_e) / 2\} - \text{середня частота спектра.}$$

Радіовипромінювання  $S(t)$  надходить на вхід рознесених у просторі на базу В двох радіоканалів з певною відносною затримкою  $\tau_s$ , що є випадковою величиною із рівномірним розподілом густини імовірності в межах  $\{\tau_{s,\min}, \tau_{s,\max}\}$ , і визначається напрямком на джерело випромінювання.

Для визначених умов виконаємо аналіз похибки вимірювання затримки  $\tau_s$  прийому радіосигналу  $S(t)$  радіоканалами кореляційного пристрою.

Сигнали  $S_1(t)$  та  $S_2(t)$ , що надходять на вхід першого та другого приймальних радіоканалів пристрою, можуть бути представлені відповідно наступним чином:

$$\begin{aligned} S_1(t) &= A(t) \cdot \cos(\omega_s t + \varphi(t) + \varphi_0); \\ S_2(t) &= A(t - \tau_s) \cdot \cos(\omega_s (t - \tau_s) + \varphi(t - \tau_s) + \varphi_0). \end{aligned} \quad (2)$$

В приймальних радіоканалах перед кореляційною обробкою сигнали  $S_1(t)$  та  $S_2(t)$  перетворюються по частоті та підсилюються з коефіцієнтом  $k$  і формуванням на проміжній частоті  $\omega_{пч}$  сигналів відповідно  $S_{1п}(t)$  та  $S_{2п}(t)$ :

$$\begin{aligned} S_{1п}(t) &= k \cdot A(t) \cos(\omega_{пч} \cdot t + \varphi(t) + \varphi_0); \\ S_{2п}(t) &= k \cdot A(t - \tau_s) \cos(\omega_{пч} (t - \tau_s) + \varphi(t - \tau_s) + \varphi_0), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\omega_{пч} = 2\pi \cdot F_{пч} = \omega_s - \omega_r$ ;

$F_{пч}$  – циклічна частота;

$\omega_r$  – частота гетеродина.

Проміжна частота радіоканалів дорівнює:

$$\omega_{ПЧ} = \left( \left( \frac{\omega_e + \omega_n}{2} \right) - \omega_r \right). \quad (4)$$

При кореляційному радіопеленгуванні з використанням компенсаційного методу сигнал першого каналу  $S_{1П}(t)$  перед кореляційною обробкою додатково затримують в каскаді із регульованою затримкою  $\tau_{ЛЗ}$  з формуванням сигналу  $S_{1П.3}(t)$ :

$$S_{1П.3}(t) = K \cdot A(t - \tau_{ЛЗ}) \cos(\omega_{ПЧ} \cdot (t - \tau_{ЛЗ}) + \varphi(t - \tau_{ЛЗ}) + \varphi_0). \quad (5)$$

Величина компенсуючої затримки  $\tau_{ЛЗ}$  змінюється таким чином, щоб скомпенсувати в сигналах  $S_{1П.3}(t)$  та  $S_{2П}(t)$  відмінність по затримці  $\tau_S$ , тобто забезпечити умову  $S_{1П.3}(t) = S_{2П}(t)$ . Ознакою рівності цих сигналів є максимальне значення взаємно кореляційної функції  $K(\tau_{ЛЗ})$  сигналів  $S_{1П.3}(t)$  та  $S_{2П}(t)$ :

$$K_{\max} = k_1 \cdot \int_0^{T_a} S_{1П.3}(t, \tau_{ЛЗ.p}) \cdot S_{2П}(t) dt, \quad (6)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт пропорційності;

$\tau_{ЛЗ.p}$  – екстремальне значення компенсуючої затримки на проміжній частоті, що забезпечує максимальне значення  $K_{\max}(\tau_{ЛЗ.p})$ ;

$T_a$  – тривалість кореляційного аналізу.

Таким чином, за оцінку часу затримки  $\tau_S$  приймають таке екстремальне значення затримки  $\tau_{ЛЗ.p}$ , яке забезпечує рівність миттєвих фаз коливань  $S_{1П.3}(t)$  та  $S_{2П}(t)$ :

$$\begin{cases} A(t - \tau_S) = A(t - \tau_{ЛЗ.p}), \\ \varphi(t - \tau_S) = \varphi(t - \tau_{ЛЗ.p}), \\ \omega_{ПЧ} \tau_{ЛЗ.p} = \omega_S \tau_S. \end{cases} \quad (7)$$

Аналіз рівнянь системи (7) показує, що вони мають різні розв'язки відносно значення  $\tau_{ЛЗ}$ :

$$\begin{cases} \tau_{ЛЗ.p1} = \tau_S, \\ \tau_{ЛЗ.p2} = (\omega_S / \omega_{ПЧ}) \tau_S. \end{cases} \quad (8)$$

При цьому  $\tau_{ЛЗ.p1} \ll \tau_{ЛЗ.p2}$ .

Таким чином, система рівнянь (7) точного розв'язку відносно  $\tau_{ЛЗ.p}$  не має, що вказує на неможливість повної компенсації відмінностей сигналів  $S_1(t)$  та  $S_2(t)$  шляхом затримки сигналу  $S_{1П}(t)$  на проміжній частоті. Як наслідок цього компенсація відмінностей сигналів  $S_{1П}(t)$  та  $S_{2П}(t)$  перед кореляційним аналізом буде здійснюватися з певною похибкою.

Для порівняння виконаємо аналогічний аналіз точності для умов використання в кореляційному пеленгаторі каналів прийому, що побудовані як радіоприймачі прямого підсилення. В цьому випадку вихідні сигнали каналів  $S_{1H}(t)$  та  $S_{2H}(t)$  будуть рівні:

$$\begin{aligned} S_{1H}(t) &= A(t) \cos(\omega_S \cdot t + \varphi(t) + \varphi_0); \\ S_{2H}(t) &= A(t - \tau_S) \cos(\omega_S(t - \tau_S) + \varphi(t - \tau_S) + \varphi_0). \end{aligned} \quad (9)$$

При кореляційному радіопеленгуванні з використанням компенсаційного методу сигнал першого каналу  $S_{1H}(t)$  перед кореляційною обробкою додатково затримують в каскаді із регульованою затримкою  $\tau_{ЛЗ}$  з формуванням сигналу  $S_{1H.3}(t)$ :

$$S_{1H.3}(t) = K \cdot A(t - \tau_{ЛЗ}) \cos(\omega_S \cdot (t - \tau_{ЛЗ}) + \varphi(t - \tau_{ЛЗ}) + \varphi_0). \quad (10)$$

Умови рівності затриманого сигналу  $S_{1H.3}(t)$  та сигналу  $S_{2H}(t)$  наступні:

$$\begin{cases} A(t - \tau_S) = A(t - \tau_{ЛЗ.p}), \\ \varphi(t - \tau_S) = \varphi(t - \tau_{ЛЗ.p}), \\ \omega_S \tau_{ЛЗ.p} = \omega_S \tau_S. \end{cases} \quad (11)$$

Розв'язки рівнянь системи (11) усі однакові та рівні величині  $\tau_{ЛЗ,р} = \tau_S$ .

Порівняння систем (7) та (11) показує, що похибка визначення дійсного часу затримки  $\tau_S$  при використанні рівнянь (8) зумовлена саме попереднім здійсненням перетворення по частоті прийнятих сигналів, тому її доцільно вважати як методичну.

Оцінимо величину методичної похибки визначення  $\tau_S$  для випадку перетворення сигналу по частоті та виконаємо аналіз її характеристик. Для цього виконаємо аналіз комплексних спектрів сигналів, що обробляються в кореляційному пеленгаторі. Нехай сигналам  $S_1(t)$  та  $S_2(t)$  відповідають комплексні спектри  $S_1(j\omega)$  та  $S_2(j\omega)$ , що визначаються на основі перетворення Фур'є [4]:

$$\begin{aligned} S_1(j\omega) &= S_1(\omega) \cdot \exp(j\psi_1(\omega)); \\ S_2(j\omega) &= S_2(\omega) \cdot \exp(j\psi_2(\omega)). \end{aligned} \quad (12)$$

Сигнали  $S_1(t)$  та  $S_2(t)$  формуються одним джерелом і відрізняються тільки часом затримки  $\tau_S$ , тому модулі їх спектрів будуть рівними, а аргументи їх будуть відрізнятися адитивною фазочастотною складовою  $\Delta\psi_S(\omega)$  [4]:

$$\begin{cases} S_1(\omega) = S_1(\omega), \\ \psi_2(\omega) = \psi_1(\omega) + \Delta\psi_S(\omega), \\ \Delta\psi_S(\omega) = -\tau_S \omega. \end{cases} \quad (13)$$

Саме складова  $\Delta\psi_S(\omega)$  містить інформацію про час затримки  $\tau_S$ , тому її доцільно визначити як сигнальну.

На виході каналів прийому на проміжній частоті спектри сигналів  $S_{1П}(t)$  та  $S_{2П}(t)$  відповідно рівні:

$$\begin{aligned} S_{1П}(j\omega) &= S_{1П}(\omega) \cdot \exp(j\psi_{1П}(\omega)) = S_1(\omega + \omega_r) \cdot \exp(j\psi_1(\omega + \omega_r)); \\ S_{2П}(j\omega) &= S_{2П}(\omega) \cdot \exp(j\psi_{2П}(\omega)) = S_2(\omega + \omega_r) \cdot \exp(j\psi_2(\omega + \omega_r)); \\ \psi_{2П}(\omega) &= \psi_{1П}(\omega) + \Delta\psi_{СП}(\omega), \end{aligned} \quad (14)$$

де  $\omega \in \{(\omega_H - \omega_r), (\omega_B - \omega_r)\}$ .

Аналіз рівнянь (13) і (14) показує, що фазові частотні спектри сигналів відрізняються на сигнальну складову  $\Delta\psi_{СП}(\omega)$ :

$$\Delta\psi_{СП}(\omega) = \Delta\psi_S(\omega + \omega_r) = -\tau_S(\omega + \omega_r) = -(\tau_S \omega + \tau_S \omega_r) \quad (15)$$

При затримці сигналу  $S_{1П}(t)$  на величину  $\tau_{ЛЗ}$  змінюється тільки його фазовий частотний спектр, який дорівнює  $\psi_{1ПЗ}(\omega)$ :

$$\psi_{1ПЗ}(\omega) = \psi_{1П}(\omega + \omega_r) + \Delta\psi_{1К}(\omega) = \psi_{1П}(\omega + \omega_r) - \tau_{ЛЗ} \omega. \quad (16)$$

Фазочастотну складову  $\Delta\psi_{1К}(\omega) = -\tau_{ЛЗ} \omega$  в рівнянні (16) доцільно визначити як компенсуючу, тому що вона формується з метою компенсації відмінності фазових частотних спектрів сигналів  $S_{1ПЗ}(j\omega)$  та  $S_{2П}(j\omega)$ .

Порівняльний аналіз рівнянь (15) та (16) показує, що компенсуюча складова  $\Delta\psi_{1К}(\omega)$  в спектрі сигналу  $S_{1ПЗ}(t)$  може скомпенсувати в кращому випадку сигнальну складову  $\Delta\psi_{СП}(\omega)$  тільки частково за умови:

$$\begin{aligned} \tau_{ЛЗ} &= \frac{\omega_S}{\omega_{ПЧ}} \tau_S = \tau_{ЛЗМ}; \\ \Delta\psi_{1ПЗ}(\omega) &= -\tau_{ЛЗМ} \omega = -\frac{\omega_S}{\omega_{ПЧ}} \tau_S \cdot \omega. \end{aligned} \quad (17)$$

При цьому похибка компенсації становить  $\delta\psi(\omega)$ :

$$\delta\psi(\omega) = \Delta\psi_S(\omega) - \Delta\psi_{1К}(\omega) = -\tau_S(\omega + \omega_r) + \frac{\omega_S}{\omega_{ПЧ}} \tau_S \cdot \omega = \tau_S \left[ \omega \left( \frac{\omega_S}{\omega_{ПЧ}} - 1 \right) - (\omega_S - \omega_{ПЧ}) \right]. \quad (18)$$

Виконаємо якісний та кількісний аналіз похибки компенсації  $\delta\psi(\omega)$ . Похибка  $\delta\psi(\omega)$  пропорційна часу затримки  $\tau_S$ , частоті  $\omega$ , та обернено пропорційна значенню проміжної частоти  $\omega_{ПЧ}$ . Час затримки

$\tau_s$  визначається напрямком на джерело випромінювання, яке априорі невідоме, тому є випадковою величиною з рівномірним розподілом густини імовірності в межах  $\{\tau_{s,\min}, \tau_{s,\max}\}$ . В результаті похибка  $\delta\psi(\omega)$  також є випадковою величиною із рівномірним розподілом густини імовірності в межах

$$\{\delta\Psi_{\min}(\omega), \delta\Psi_{\max}(\omega)\} = \left\{ \tau_{s,\min} \left[ \omega_n \left( \frac{\omega_s}{\omega_{ПЧ}} - 1 \right) - (\omega_s - \omega_{ПЧ}) \right]; \tau_{s,\max} \left[ \omega_e \left( \frac{\omega_s}{\omega_{ПЧ}} - 1 \right) - (\omega_s - \omega_{ПЧ}) \right] \right\}.$$

Відповідно дисперсія та математичне очікування значення похибки  $\delta\psi(\omega)$  дорівнюють:

$$\sigma_\delta^2 = 0.25 \cdot (\delta\Psi_{\max}(\omega) - \delta\Psi_{\min}(\omega))^2; \quad M_\delta = 0.5 \cdot (\delta\Psi_{\max}(\omega) + \delta\Psi_{\min}(\omega)).$$

Похибка компенсації  $\delta\psi(\omega)$  зумовлює відповідно певну похибку визначення часу затримки  $\tau_s$  та напрямку на джерело. Необхідно відзначити, що відліки похибки  $\delta\psi(\omega)$  для частот смуги пропускання каналів корельовані, тому доцільно похибку компенсації  $\delta\psi(\omega)$  представити як неідентичність фазочастотних характеристик каналів прийому. В цьому випадку похибки визначення  $\tau_s$  та пеленгування доцільно оцінювати по вже відомих співвідношеннях та графіках [1, 2].

На рис. 1 з урахуванням рівняння (18) наведені залежності похибки компенсації  $\delta\psi(\omega)$  від проміжної частоти радіоканалів пеленгатора  $\omega_{ПЧ}$  та бази В каналів прийому. Залежності побудовані для наступних умов: значення бази рівні  $B_1 = 10\text{ м}; B_2 = 2\text{ м}; B_3 = 0,5\text{ м}$ ; несуча частота сигналу  $\omega_s = 6,28 \cdot 10^9 \text{ рад/с}$ ; ширина спектра сигналу  $\Delta\omega = 6,28 \cdot 10^6 \text{ рад/с}$ . Аналіз залежностей на рис. 1 показує, що похибка компенсації  $\delta\psi(\omega)$  обернено пропорційна проміжній частоті  $\omega_{ПЧ}$  та прямо пропорційна базі.

Отримані співвідношення та графіки дають можливість оцінити граничне значення похибки  $\delta\psi_{\max}(\omega)$  за умови  $\omega_{ПЧ} \ll \omega_s$ , яке становить за модулем  $\delta\psi_{\max}(\omega) = \pi$  радіан. Аналіз показує, що при таких значеннях неідентичності частотних характеристик каналів прийому виникають суттєві енергетичні втрати за рахунок зменшення величини максимуму кореляційної функції  $K_{12}(\tau_{ЛЗР})$  та зміщення у часі максимального її відгуку [1, 2].

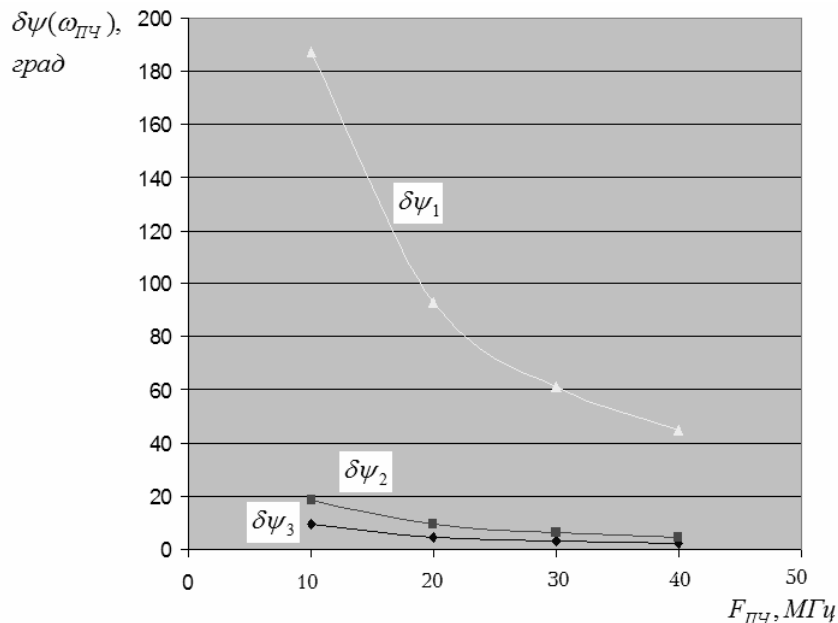


Рис. 1

Вказані енергетичні втрати пропорційні величині  $\Delta K_{12}(\tau_{ЛЗР}) = K_1 \cos(\omega_T \tau_s)$  і можуть зумовити погіршення чутливості до 20дБ. Зміщення у часі максимального відліку  $K_{12}(\tau_{ЛЗР})$  зумовлює абсолютну похибку визначення затримки  $\tau_s$ , що сягає 40 %, та відповідно похибку напрямку на джерело, яка може сягати  $72^\circ$  [1, 2].

Таким чином результати досліджень показали, що при кореляційному часовому компенсаційному пеленгуванні з обробкою сигналів на проміжній частоті виникає методична похибка компенсації, яка зумовлює суттєві до 20 дБ енергетичні втрати та значну похибку пеленгування – до  $72^\circ$ . Зменшення

даних втрат та похибки пеленгування може досягатися збільшенням проміжної частоти або зменшенням просторової бази В, що суттєво ускладнює технічну реалізацію пеленгатора.

Виконаємо аналіз методичної похибки компенсації при використанні цифрової обробки радіосигналів. В цьому випадку після перетворення по частоті та попередньої частотної селекції та підсилення здійснюють аналого-цифрове перетворення прийнятих радіоканалами реалізацій радіовипромінювання. Доцільно аналого-цифрове перетворення радіосигналів на проміжній частоті здійснювати з використанням процедури цифрового гетеродинування [4, 8], що забезпечує встановлення оптимального значення частоти дискретизації  $F_d$ . Для цих умов здійснюється додаткове цифрове перетворення спектра прийнятого радіоканалами радіосигналу і з урахуванням цього рівняння (14) можливо представити у вигляді:

$$\begin{aligned} S_{1ПЦ}(j\omega_k) &= S_{1П}(\omega_k) \cdot \exp(j\psi_{1П}(\omega_k)) = S_1(\omega_k + \omega_r + K_r \cdot F_d) \cdot \exp(j\psi_1(\omega_k + \omega_r + K_r \cdot F_d)); \\ S_{2ПЦ}(j\omega_k) &= S_{2П}(\omega_k) \cdot \exp(j\psi_{2П}(\omega_k)) = \\ &= S_2(\omega_k + \omega_r + K_r \cdot F_d) \cdot \exp(j\psi_2(\omega_k + \omega_r + K_r \cdot F_d)); \\ \psi_{2П}(\omega_k) &= \psi_{1П}(\omega_k) + \Delta\psi_{СП}(\omega_k), \end{aligned} \tag{19}$$

де  $K_r$  – коефіцієнт цифрового гетеродинування;

$k = 0, 1, \dots, (N-1)$  – номер частотного відліку;

$N$  – кількість відліків прийнятої реалізації.

Аналіз рівняння (19) показує, що при аналого-цифровому перетворенні з використанням процедури цифрового гетеродинування здійснюється додаткове еквівалентне зменшення проміжної частоти  $\omega_{ПЦ}$  до значення  $\omega_{ПЦЦ} = 0,5\pi \cdot F_d$ . В результаті значення методичної похибки компенсації кореляційного пеленгатора збільшується і визначається рівнянням (20):

$$\delta\psi(\omega) = \tau_s \left[ \omega \left( \frac{\omega_s}{\omega_{ПЦ} - 2\pi K_r \cdot F_d} - 1 \right) - (\omega_s - (\omega_{ПЦ} - 2\pi K_r \cdot F_d)) \right]. \tag{20}$$

Аналіз рівняння (20) показує, що для зменшення методичної похибки компенсації аналого-цифрове перетворення вихідних сигналів радіоканалів необхідно здійснювати з частотою дискретизації при нульовому коефіцієнті гетеродинування і частоті дискретизації, що дорівнює  $F_d \geq F_{ПЦ} + (\omega_s - \omega_n) / 4\pi$ , що призводить до формування та обробки надлишкової кількості відліків прийнятих радіоканалами реалізацій.

В роботі також виконано програмне моделювання роботи цифрового кореляційного радіопеленгатора, що реалізує компенсаційний метод, та виконані дослідження впливу методичної похибки компенсації на відносну похибку  $\delta_r$  визначення затримки прийому випромінювання радіоканалами та відповідної похибки пеленгування. Результати досліджень представлені на рис. 2, де відображена залежність похибки  $\delta_r$  від ширини спектра радіовипромінювання за умови великого відношення сигнал/шум.

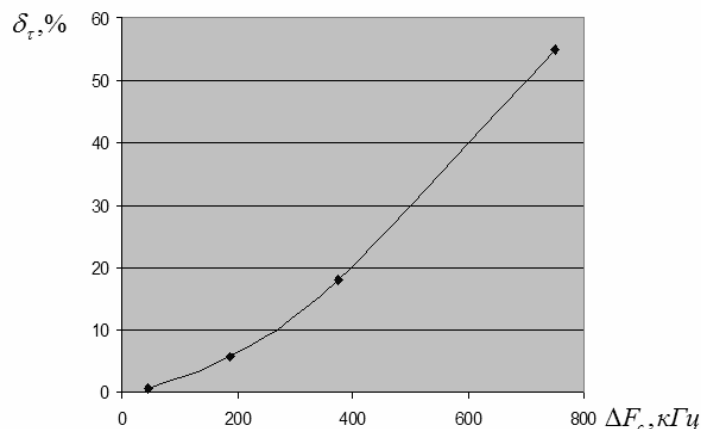


Рис. 2

Результати досліджень на рис. 2 отримані для наступних умов: вид модуляції – лінійна частотна, несуча частота  $F_c = 100 \text{ МГц}$ , антенна база – 1м.

Аналіз залежності відносної похибки пеленгування на рис. 2 показує, що методична похибка компенсації має на неї суттєвий вплив і може зумовлювати збільшення відносної похибки пеленгування до 60 %. Результати моделювання в цілому узгоджуються з попередньо отриманими результатами аналітичних досліджень.

Отримані результати показали, що при аналізі та синтезі кореляційних пристроїв пеленгування, особливо широкосмугових, необхідно враховувати наявність методичної похибки компенсації та визначати відповідні значення параметрів радіоканалів.

**Висновки.** Таким чином, результати проведеного аналізу показали, що компенсаційному кореляційному методу визначення затримки радіосигналу з аналізом на проміжній частоті притаманна наявність відповідної методичної похибки пеленгування, що може сягати 60 % і зумовлюється похибкою компенсації  $\delta\psi(\omega)$ , що може сягати величини  $\pi$  радіан в смузі пропускання радіоканалів. Максимальне значення похибки пеленгування суттєво залежить від співвідношення частоти сигналу та проміжної частоти радіоканалів прийому, а також від ширини смуги їх пропускання і величини бази В.

Отримані результати можуть бути використані при аналізі та синтезі кореляційних радіонавігаційних пристроїв, а також кореляційних радіопеленгаторів систем радіоконтролю.

В подальшому доцільно виконати дослідження точності аналізу радіосигналів в кореляційних радіонавігаційних пристроях Н та М типів при прийомі широкосмугових радіовипромінювань та синтез методів усунення методичної похибки компенсації та пеленгування.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Белавин О.В.* Основы радионавигации: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.: ил.
2. *Винокуров В.И., Ваккер Р.А.* Вопросы обработки сложных сигналов в корреляционных системах. – М.: Советское радио, 1972. – 216 с.
3. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана: Учебное пособие для вузов. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
4. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учеб. пособие / В.А. Васин, И.Б. Власов, Ю.М. Егоров и др. / Под ред. И.Б. Фёдорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 768 с.: ил.
5. Радиотехнические системы / Под ред. Ю.И. Казаринова. – Высш. шк., 1990. – 486 с.
6. *Вартанесян В.А., Гойхман Э.Ш., Рогаткин М.И.* Радиопеленгация. – М.: Воениздат, 1966. – 248 с.
7. *Тихонов В.И.* Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
8. *Ципоренко В.В.* Точність кореляційного радіопеленгатора з обробкою радіосигналу на проміжній частоті в умовах апріорної невизначеності // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – № III (42). – 2007. – С. 101–106.

ЦИПОРЕНКО Віталій Валентинович – аспірант кафедри електронних апаратів Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– пошук та аналіз радіовипромінювань з використанням цифрових методів обробки.

Подано 24.09.2008

**Ципоренко В.В.** Точність кореляційного радіопеленгатора з обробкою радіосигналу на проміжній частоті в умовах апіорної невизначеності

**Ципоренко В.В.** Точность корреляционного радиопеленгатора с обработкой радиосигнала на промежуточной частоте в условиях апriorной неопределённости

**Tsiporenko V.V.** Accuracy of correlation radio direction finder with processing of a radiosignal on the intermediate frequency in conditions of aprioristic uncertainty

УДК 621.37:621.391

**Точность корреляционного радиопеленгатора с обработкой радиосигнала на промежуточной частоте в условиях апriorной неопределённости / В.В. Ципоренко**

Выполнен анализ особенностей корреляционного метода определения направления на источник радиоизлучения, который использует временной анализ принятых радиосигналов на промежуточной частоте. Для условий апriorной неопределенности относительно частоты радиосигнала полученная оценка методической погрешности корреляционного пеленгатора и определены её основные характеристики в зависимости от параметров радиосигнала и радиопеленгатора. Показано, что при обработке радиосигналов на промежуточной частоте погрешность временного анализа может достигать шестнадцати процентов при большом отношении сигнал/шум.

УДК 621.37:621.391

**Accuracy of correlation radio direction finder with processing of a radiosignal on the intermediate frequency in conditions of aprioristic uncertainty / V.V. Tsiporenko.**

The analysis of features of a correlation method of definition of a direction on a source of radoradiation is executed which uses the temporary analysis of the accepted radiosignals on the intermediate frequency. For conditions of aprioristic uncertainty concerning frequency of a radiosignal the received estimation of a methodical error of correlation radio direction finder is also determined by the basic characteristics depending on parameters of a radiosignal and radio direction finder. It is shown, that at processing of radiosignals on the intermediate frequency the error of the temporary analysis can reach sixteen percents at the large attitude signal/noise.