

В.В. Ципоренко, аспір.

Житомирський державний технологічний університет

ТОЧНІСТЬ КОРЕЛЯЦІЙНОГО РАДІОПЕЛЕНГАТОРА З ОБРОБКОЮ РАДІОСИГНАЛУ НА ПРОМІЖНІЙ ЧАСТОТІ В УМОВАХ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ*(Представлено д.т.н., проф. Коваленком М.В.)*

Виконано аналіз особливостей кореляційного методу визначення напрямку на джерело радіовипромінювання, що використовує часовий аналіз прийнятих радіосигналів на проміжній частоті. Для умов апріорної невизначеності щодо частоти радіосигналу отримана оцінка методичної похибки кореляційного пеленгатора та визначені її основні характеристики залежно від параметрів радіосигналу та радіопеленгатора. Показано, що при обробці радіосигналів на проміжній частоті похибка часового аналізу може сягати до шістнадцяти відсотків при великому відношенні сигнал/шум.

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 й умовах апріорної 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 у радіонавігаційних системах у складній електромагнітній обстановці є актуальною проблемою.

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 апріорній 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 у цих роботах розглянуто не достатньо.

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 у цій роботі не досліджено вплив на точність аналізу попереднього перетворення частоти радіосигналів, а також особливостей умов невизначеності.

В роботі [3] досліджено питання побудови радіопеленгаторів та кореляційних пристроїв пасивної радіолокації та їх точнісних характеристик в умовах невизначеності щодо дальності до джерела випромінювання. Для цих умов отримано 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.

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

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Таким чином, невирішеною раніше частиною загальної проблеми аналізу точності кореляційних радіонавігаційних пристроїв є аналіз залежності точності кореляційної часової обробки радіосигналів від виду попередньої їх обробки для

умов невизначеності. В першу чергу дана задача є актуальною для пристроїв, що здійснюють кореляційну компенсаційну обробку на проміжній частоті в умовах апріорної невизначеності.

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 по частоті в приймальних радіоканалах; дослідження впливу на точність компенсаційної кореляційної обробки радіосигналів у радіонавігаційних пристроях умов апріорної невизначеності щодо їх частоти; дослідження залежності точності кореляційної обробки радіосигналів на проміжній частоті від параметрів каналів радіоприйому радіонавігаційного пристрою.

Викладення основного матеріалу дослідження. Нехай необхідно визначити час затримки радіосигналів, що приймаються двоканальним кореляційним радіонавігаційним пристроєм при використанні компенсаційного методу вимірювання [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 $S(t)$ приймальними радіоканалами визначається за максимумом взаємно кореляційної функції їх вихідних радіосигналів на проміжній частоті, який знаходиться шляхом регулювання компенсаційної затримки в одному з каналів. Взаємно кореляційна функція радіосигналів визначається на проміжній частоті, тому пристрій в цілому належить до класу Н [1].

Нехай обробка радіосигналу $S(t)$ здійснюється для великого відношення сигнал/шум та невизначеності його частоти. Сам радіосигнал $S(t)$ являє собою неперервне вузькосмугове випромінювання з незмінною потужністю і випадковою середньою частотою ω_s спектра, яка рівномірно може приймати значення в смузі частот $\{\omega_n, \omega_e\}$, що відповідає смузі Н пропускання приймальних радіоканалів:

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

де: A, φ_0 – відповідно амплітуда та початкова фаза;

$\omega_s \in \{\omega_n, \omega_e\}$ – частота сигналу, значення якої є випадковою величиною з рівномірним розподілом густини імовірності в смузі частот шириною $\Delta\omega_{\Pi} = \omega_e - \omega_n$.

Сигнал $S(t)$ надходить на вхід рознесених у просторі радіоканалів з певною затримкою τ_s , що є випадковою величиною із рівномірним розподілом в межах $\{\tau_{s,\min}, \tau_{s,\max}\}$ і визначається напрямком на джерело випромінювання.

Для вказаних умов виконаємо аналіз похибки вимірювання затримки τ_s прийому радіосигналу $S(t)$ радіоканалами кореляційного пристрою.

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

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

Перед кореляційною обробкою прийняті сигнали $S_1(t)$ та $S_2(t)$ перетворюються по частоті та підсилюються з формуванням на проміжній частоті сигналів відповідно $S_{1\Pi}(t)$ та $S_{2\Pi}(t)$:

$$\begin{aligned} S_{1\Pi}(t) &= K \cdot A \cos((\omega_s - \omega_r) \cdot t + \varphi_0) \\ S_{2\Pi}(t) &= K \cdot A \cos((\omega_s - \omega_r) \cdot t - \omega_s \tau_s + \varphi_0), \end{aligned} \quad (3)$$

де ω_r – частота гетеродина.

Проміжна частота радіоканалів дорівнює:

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

Частота сигналу на виході радіоканалів перед кореляційним аналізом дорівнює:

$$\omega_{s,ПЧ} = (\omega_s - \omega_r). \quad (5)$$

При компенсаційному методі вимірювання часу затримки сигнал першого каналу $S_{1П}(t)$ перед кореляційною обробкою додатково затримують у каскаді із регульованою затримкою $\tau_{ЛЗ}$:

$$S_{1П.З}(t) = K \cdot A \cos((\omega_s - \omega_r) \cdot (t - \tau_{ЛЗ}) + \varphi_0). \quad (6)$$

Величина компенсуючої затримки $\tau_{ЛЗ}$ змінюється таким чином, щоб забезпечити максимальне значення взаємно кореляційної функції $K(\tau_{ЛЗ})$ сигналів $S_{1П.З}(t)$ та $S_{2П}(t)$:

$$K_{\max} = K_1 \cdot \int_0^{T_2} S_{1П.З}(t, \tau_{ЛЗ.р}) \cdot S_{2П}(t) dt. \quad (7)$$

де $\tau_{ЛЗ.р}$ – екстремальне значення компенсуючої затримки, що забезпечує максимальне значення $K_{\max}(\tau_{ЛЗ.р})$.

Умовою забезпечення рівняння (7) є рівність миттєвих фаз коливань $S_{1П.З}(t)$ та $S_{2П}(t)$:

$$(\omega_s - \omega_r) \cdot t - \omega_s \cdot \tau_s + \varphi_0 = (\omega_s - \omega_r) \cdot (t - \tau_{ЛЗ}) + \varphi_0. \quad (8)$$

Розв'язком рівняння (6) є оцінка затримки сигналу ϵ_s і відповідний напрямок на джерело випромінювання [1]:

$$\epsilon_s = \left(\frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \right) \cdot \tau_{ЛЗ.р}. \quad (9)$$

де ϵ_s – оцінка часу затримки τ_s .

З урахуванням (3) рівняння (9) прийме вигляд:

$$\epsilon_s = \left(\frac{\omega_{ПЧ} + \Delta\omega_s}{\omega_{П} + \Delta\omega_s} \right) \cdot \tau_{ЛЗ.р} = \left(\frac{1 + (\Delta\omega_s / \omega_{ПЧ})}{K_\omega + (\Delta\omega_s / \omega_{ПЧ})} \right) \cdot \tau_{ЛЗ.р}. \quad (10)$$

де: $K_\omega = \frac{\omega_{П}}{\omega_{ПЧ}}$ – коефіцієнт перетворення частоти;

$\Delta\omega_s = \omega_s - \omega_{П}$ – відхилення частоти сигналу від частоти настроювання каналів прийому;

$\omega_{П} = (\omega_B + \omega_H) / 2$ – середня частота смуги прийому, що є частотою настроювання приймачів.

Із рівняння (10) видно, що при співпадінні частоти сигналу ω_s із частотою настроювання $\omega_{П}$ каналів прийому, тобто при $\omega_s = \omega_{П}$, оцінка часу затримки ϵ_{s_0} дорівнює:

$$\epsilon_{s_0} = \frac{\tau_{ЛЗ.р}}{K_\omega}. \quad (11)$$

Відомі кореляційні компенсаційні методи та відповідні пристрої вимірювання затримки сигналу τ_s використовують попереднє калібрування значень компенсуючої затримки згідно з рівняння (11) [1, 2].

Для умов поставленої задачі попереднє калібрування компенсуючої лінії затримки згідно з (11) визначає появу характерної похибки $\Delta\epsilon_s$ вимірювання:

$$\Delta\epsilon_s = \epsilon_{s_0} - \epsilon_s = \frac{(1 - K_\omega) \cdot (\Delta\omega_s / \omega_{ПЧ})}{K_\omega \cdot (K_\omega + \Delta\omega_s / \omega_{ПЧ})} \cdot \tau_{ЛЗ.р}. \quad (12)$$

Аналіз рівняння (12) показує, що похибка $\Delta\epsilon_s$ є випадковою величиною з рівномірним розподілом густини імовірності в межах $\{\Delta\epsilon_{SH}; \Delta\epsilon_{SB}\}$, що відповідають граничним частотам смуги пропускання каналів прийому $\{\omega_H, \omega_B\}$:

$$\Delta \mathcal{E}_{SH} = \frac{(K_{\omega} - 1) \cdot (\Delta \omega_{\Pi} / \omega_{\Pi\mathcal{C}})}{K_{\omega} \cdot (K_{\omega} - \Delta \omega_{\Pi} / \omega_{\Pi\mathcal{C}})} \cdot \tau_{ЛЗ.р}, \quad (13)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{SB} = \frac{(1 - K_{\omega}) \cdot (\Delta \omega_{\Pi} / \omega_{\Pi\mathcal{C}})}{K_{\omega} \cdot (K_{\omega} + \Delta \omega_{\Pi} / \omega_{\Pi\mathcal{C}})} \cdot \tau_{ЛЗ.р}. \quad (14)$$

Похибка вимірювання $\Delta \mathcal{E}_S$ притаманна компенсуючому способу вимірювання на проміжній частоті з попереднім калібруванням. Це видно із порівняльного аналізу цієї ж похибки вимірювання $\Delta \mathcal{E}_S$, але при реалізації радіоканалів пристрою на основі приймачів прямого підсилення. Для цього випадку рівняння (9) та (10) мають відповідно вигляд (15) та (16):

$$\omega_S(t - \tau_{ЛЗ.р}) + \varphi_0 = \omega_S \cdot t - \omega_S \tau_S + \varphi_0, \quad (15)$$

$$\mathcal{E}_S = \tau_{ЛЗ.р}. \quad (16)$$

Аналіз рівнянь (15) і (16) показує, що незалежно від значення частоти сигналу ω_S в межах смуги пропускання $\{\omega_n, \omega_b\}$ оцінка \mathcal{E}_S затримки його прийому співпадає з екстремальним значенням компенсуючої затримки $\tau_{ЛЗ.р}$ без додаткових похибок. Виходячи із цього, похибку визначення затримки $\Delta \mathcal{E}_S$ (12) доцільно вважати методичною похибкою, тому що вона зумовлюється тільки методом вимірювання.

Аналіз рівнянь (14), (15) та (16) показує, що методична похибка $\Delta \mathcal{E}_S$ залежить від параметрів каналів прийому, таких як проміжна частота $\omega_{\Pi\mathcal{C}}$, ширина смуги пропускання $\Delta \omega_{\Pi}$, коефіцієнт K_{ω} перетворення частоти, а також від самого значення затримки сигналу τ_S . При незмінних параметрах каналів прийому та часу затримки сигналу τ_S методична похибка має нульове математичне очікування та дисперсію, що не перевищує значення:

$$\delta_{\tau}^2 = \frac{(\tau_{ЛЗ.р} \cdot (\Delta \omega_S / \omega_{\Pi\mathcal{C}}))^2}{12 \cdot K_{\omega}^2}. \quad (17)$$

На рис. 1 та рис. 2 наведені залежності максимального значення відносної методичної похибки $\delta\tau_{\max}$ від значення проміжної частоти $\omega_{\Pi\mathcal{C}}$ та ширини смуги пропускання $\Delta \omega_{\Pi}$:

$$\delta\tau_{\max} = \frac{\Delta \mathcal{E}_S}{\tau_S} \cdot 100\% = \left[1 - \frac{\omega_{\Pi\mathcal{C}}}{\omega_S} \cdot \frac{(\omega_S + \Delta \omega_{\Pi} / 2)}{(\omega_{\Pi\mathcal{C}} + \Delta \omega_{\Pi} / 2)} \right]. \quad (18)$$

Залежності для рис. 1 отримані для наступних умов:

$\delta\tau_{\max} = \tau(\omega_{\Pi})$; $\omega_{\Pi.1} = 50$ МГц; $\omega_{\Pi.2} = 1000$ МГц; $\omega_S = \text{const}$; $\Delta \omega_{\Pi} = \text{const}$; $\omega_{\Pi\mathcal{C}} = \text{Var}(1 \div 10)$ МГц; $\Delta \omega_{\Pi} = 0,4$ МГц.

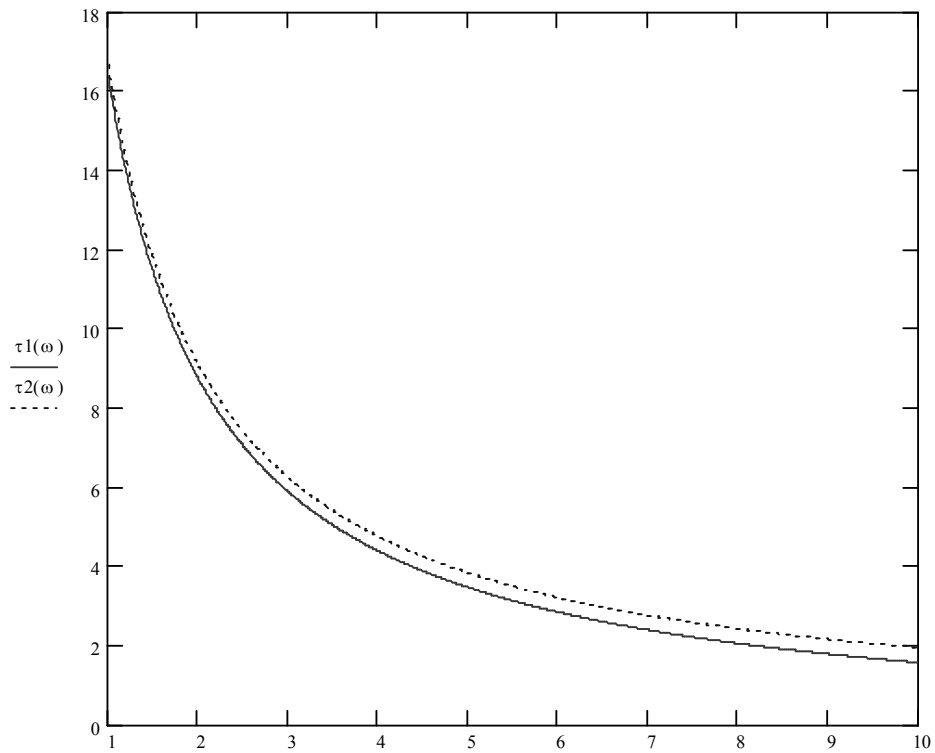


Рис. 1^ω

Залежності для рис. 2 отримані для наступних умов:

$\omega_{пч} = \text{const}$; $\omega_{п} = \text{const}$; $\Delta\omega_{п} = \text{Var}(0.01 \div 2) \text{ МГц}$; $\omega_{п} = 200 \text{ МГц}$; $\omega_{пч.1} = 5 \text{ МГц}$; $\omega_{пч.2} = 10 \text{ МГц}$; $\omega_{пч.3} = 20 \text{ МГц}$.

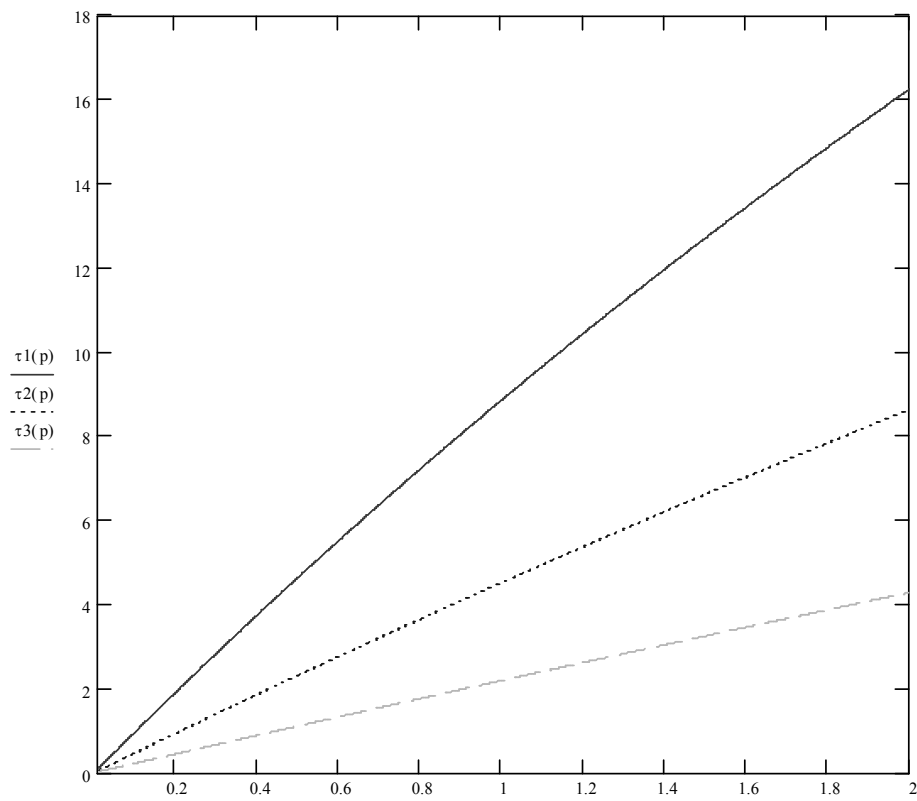


Рис. 2^p

Аналіз графіків на рис. 1 та рис. 2 показує, що похибка вимірювання $\delta\tau_{\max}$ обернено пропорційна коефіцієнту K_{ω} та пропорційна ширині смуги пропускання $\Delta\omega_{\Pi}$. Оцінимо межові значення похибки $\delta\tau_{\max}$ для типових умов функціонування навігаційних кореляційних пристроїв.

Отримані результати показують, що методична похибка вимірювання затримки $\delta\tau_{\max}$ може сягати 16 %, що суттєво впливає на ефективність функціонування відповідної апаратури.

Висновки. Таким чином, результати проведеного аналізу показали, що для умов апріорної невизначеності компенсаційний кореляційний метод визначення затримки радіосигналу з аналізом на проміжній частоті зумовлює наявність відповідної методичної похибки, що може лежати в межах від одиниць до десятків відсотків. Максимальне значення цієї похибки суттєво залежить від співвідношення частоти сигналу та проміжної частоти радіоканалів прийому, а також від ширини смуги їх пропускання.

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 у кореляційних радіонавігаційних пристроях Н та М типів при прийомі широкосмугових радіовипромінювань.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Белавин О.В.* Основы радионавигации: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.
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.
5. Радиотехнические системы / Под ред. Ю.И. Казаринова. – М.: 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.

ЦИПОРЕНКО Віталій Валентинович – аспірант кафедри біомедичних приладів та систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– радіопеленгування з використанням цифрової обробки сигналів.

Подано 25.03.2007