

В.В. Ципоренко, доц.
В.Г. Ципоренко, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

АНАЛІЗ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ БЕЗПОШУКОВОГО СПЕКТРАЛЬНОГО КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО РАДІОПЕЛЕНГАТОРА

Проведено аналіз завадостійкості безпошукового спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора, що здійснює пряму оцінку часу затримки та відповідного напрямку на джерело радіовипромінювання за один цикл кореляційного оброблення.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями. На сьогодні радіомоніторинг радіоелектронних засобів повинен здійснюватися в умовах складної електромагнітної обстановки (ЕМО), великої апріорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах реального масштабу часу. Перспективним напрямком реалізації радіомоніторингу для вказаних умов є використання цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів [1, 2, 4].

З урахуванням складної ЕМО актуальним завдання є аналіз завадостійкості апаратури радіомоніторингу і, в тому числі, радіопеленгування. Тому дослідження завадостійкості цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів для ЕМО різної складності є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми. В роботі [4] розроблено безпошуковий кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування, що здійснює максимально правдоподібну оцінку часу затримки прямим аналітичним методом за один цикл кореляційного оброблення. Це дозволяє здійснювати кореляційно-інтерферометричне пеленгування джерел широкосмугових радіовипромінювань в умовах реального масштабу часу. Дослідження можливості використання такого методу в умовах складної електромагнітної обстановки в цій роботі не проведено.

В роботах [5, 6, 7] виконано дослідження спектрально-енергетичного методу розділення та виявлення спектрів сигналів для умов простої ЕМО, коли спектри сигналів різних джерел радіовипромінювань (ДРВ) в межах смуги прийому не перекриваються та не перемежуються, з використанням класичного критерію Релея або параметричних критеріїв. Однак, дослідження завадостійкості безпошукового спектрального кореляційно-інтерферометричного методу пеленгування, що використовує двоелементну антенну решітку для вказаних умов не проведено.

В роботах [8, 9, 10] виконано дослідження енергетично-просторового методу розділення, виявлення та оцінка параметрів сигналів у прийнятій суміші для умов складної ЕМО, коли одночасно приймаються сигнали різних ДРВ, спектри яких перемежуються. Однак, дослідження точності безпошукового спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора, що використовує двоелементну антенну решітку для вказаних умов не проведено.

В роботі [11] для умов складної ЕМО виконано дослідження завадостійкості відомих методів пеленгування з урахуванням впливу операцій детектування. Отримано аналітичні оцінки похибок пеленгування, їх максимальні значення та відповідне співвідношення фазових характеристик сигналу та завади. Але завадостійкість кореляційно-інтерферометричних методів пеленгування не досліджено.

В роботах [12, 13] досліджено статистичні характеристики та завадостійкість класичного багатоітераційного кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора. Однак, дослідження особливостей безпошукового спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування не досліджено.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Таким чином, невирішеною раніше частиною загальної проблеми дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є дослідження завадостійкості безпошукового спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора, що використовує двоелементну антенну решітку (АР).

Формулювання цілей статті. Відповідно до невирішених раніше частин загальної проблеми дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, цілями статті є: дослідження завадостійкості безпошукового спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з використанням двоелементної АР.

Викладення основного матеріалу дослідження. Аналіз можливих варіантів електромагнітної обстановки показує, що спектри корисного сигналу і завади можуть співвідноситись з урахуванням смуги частот, що вони займають, за такими варіантами [6–10, 13]:

1. Смуга частот $[\omega_{S,I}; \omega_{S,A}]$ енергетичного спектра корисного сигналу $S_M(\omega)$ і смуга частот $[\omega_{Z,I}; \omega_{Z,A}]$ завади $S_Z(\omega)$ не перекриваються: $[\omega_{S,I}; \omega_{S,A}] \notin [\omega_{Z,I}; \omega_{Z,A}]$, (рис. 1).

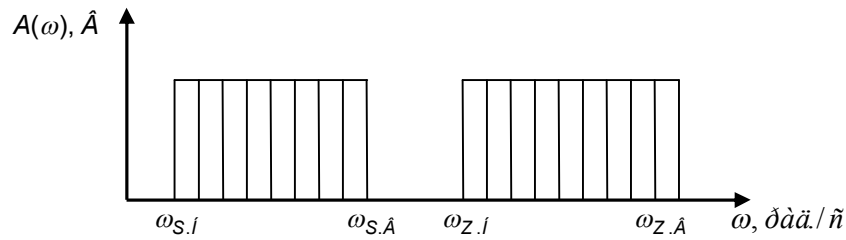


Рис. 1. Зображення спектра корисного сигналу, що не перекривається зі спектром завади

2. Смуга частот спектрів корисного сигналу і завади перекриваються. При цьому завади доцільно поділити на такі види:

– широкосмугові некорельовані з корисним сигналом, що відповідають широкосмуговим випромінюванням сучасних засобів зв'язку та комп'ютерних систем передачі інформації типу «WiFi» та їх перевідбиттям з шириною смуги частот $\Delta\omega_z = \omega_{z.B} - \omega_{z.H}$ більшою, ніж ширина смуги частот $\Delta\omega_s = \omega_{S.A} - \omega_{S.I}$, корисного сигналу: $[\Delta\omega_z \geq \Delta\omega_s]$, (рис. 2);

– широкосмугові корельовані з корисним сигналом, що відповідають перевідбитим випромінюванням радіоелектронних засобів (РЕЗ), що пеленгуються в поточний момент часу з шириною смуги частот $\Delta\omega_z$ більшою, ніж ширина смуги частот $\Delta\omega_s$ корисного сигналу: $[\Delta\omega_z \geq \Delta\omega_s]$, (рис. 2);

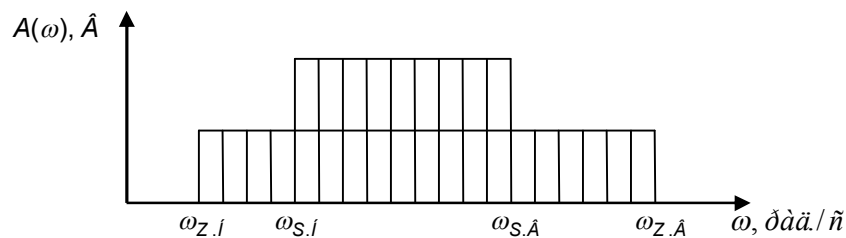


Рис. 2. Зображення спектра корисного сигналу, що перекривається зі спектром завади

– вузькосмугові завади, що відповідають позасмуговим та паразитним випромінюванням РЕЗ, а також основні випромінювання РЕЗ, що використовують вузькосмугові сигнали з шириною смуги частот $\Delta\omega_z$ меншою, ніж ширина смуги частот $\Delta\omega_s$ корисного сигналу: $[\Delta\omega_z \ll \Delta\omega_s]$, (рис. 3). Будемо вважати, що смуга пропускання пеленгатора $\Delta\omega_p$ перевищує ширину спектра сигналу, що пеленгується, враховуючи умову апріорної невизначеності щодо ширини спектра і несучої частоти випромінювання, тобто $\Delta\omega_p > \Delta\omega_s$.

Розглянемо задачу дослідження завадостійкості безпешукового спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора, що використовує двоелементну антенну решітку з величиною бази d для умов складної електромагнітної обстановки, що характеризується прийомом у межах смуги пропускання адитивної суміші сигналу та завади. Нехай здійснюється прийом випромінювань двома пеленгаційними каналами, що рознесені у просторі, з власними шумами $n_1(t)$ і $n_2(t)$.

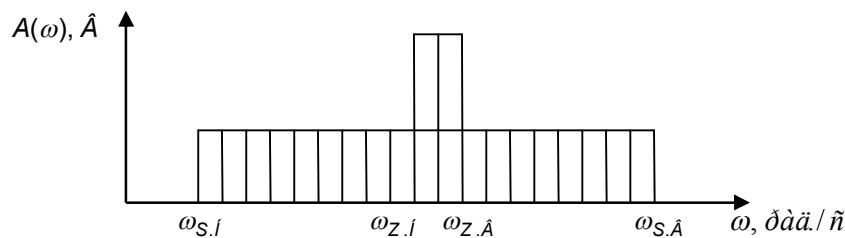


Рис. 3. Зображення спектра корисного сигналу, що перекривається зі спектром завади

Нехай $S_{1M}(t)$ – сигнал, що приймається в адитивній суміші $U_1(t)$, зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n_1(t)$ та завадою $S_{1Z}(t)$ впродовж часового інтервалу $t \in [0, T_a]$ першою антеною, а $S_{2M}(t)$ – сигнал, що приймається в адитивній суміші $U_2(t)$, зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n_2(t)$ та завадою $S_{2Z}(t)$ впродовж часового інтервалу $t \in [0, T_a]$ другою антеною. Шуми $n_1(t)$ і $n_2(t)$, сигнали $S_{1M}(t)$ і $S_{2M}(t)$ та завади $S_{1Z}(t)$ і $S_{2Z}(t)$ є обмеженими по смузі частот радіопеленгатора $[\omega_l; \omega_A]$. Вихідні умови запишемо таким чином:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= S_{1M}(t) + S_{1Z}(t) + n_1(t); \\ U_2(t) &= S_{2M}(t) + S_{2Z}(t) + n_2(t); \\ S_{2M}(t) &= S_{1M}(t - \tau_S); \\ S_{2Z}(t) &= S_{1Z}(t + \tau_Z), \end{aligned} \tag{1}$$

де τ_S – апріорі невідома відносна затримка прийому корисного сигналу пеленгаційними каналами, що є випадковою величиною з рівномірним розподілом густини ймовірності в інтервалі $[-\tau_{S,max}; \tau_{S,max}]$; τ_Z – апріорі невідома відносна затримка прийому завади пеленгаційними каналами, що є випадковою величиною з рівномірним розподілом густини ймовірності в інтервалі $[-\tau_{S,max}; \tau_{S,max}]$.

Необхідно виконати аналіз завадостійкості безошукового спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування при різних типах завад.

Розглянемо випадок, (рис. 1), коли смуга частот спектрів корисного сигналу і завади не перекривається та їх спектри розділено за частотою.

Особливістю застосування спектральної області визначення є можливість ефективної попередньої частотної селекції сигналів і завад, спектри яких не перекриваються [5–7]. Тоді за умови частотної селекції в межах смуги пропускання пеленгатора $\Delta\omega_p$, в результуючому відгуку будуть відсутні взаємні кореляційні складові корисного сигналу та завади, а також автокореляційна складова завади. Необхідно відмітити, що попередня частотна селекція забезпечується без застосування додаткових спеціальних операцій оброблення спектрів прийнятих сумішей. В цьому випадку точність пеленгування буде визначатися тільки впливом власних шумів $n_1(t)$ і $n_2(t)$.

При відсутності завад і з урахуванням власних шумів, згідно з цифровим безошуковим спектральним кореляційно-інтерферометричним методом пеленгування, після спектрального аналізу прийнятих пеленгаційними каналами радіовипромінювань визначається пряма максимально правдоподібна оцінка еквівалентного значення частотно-незалежного фазового зсуву $\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S,H})$ згідно з рівнянням [4]:

$$\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S,H}) = \arctg \left[\frac{\sum_{k=S,H}^{S,B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot U_1(\omega_k) \cdot U_2(\omega_k) \cdot \sin[\Delta\varphi_m(\omega_k) \cdot \omega_{S,H} / \omega_k]}{\sum_{k=S,H}^{S,B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot U_1(\omega_k) \cdot U_2(\omega_k) \cdot \cos[\Delta\varphi_m(\omega_k) \cdot \omega_{S,H} / \omega_k]} \right] + \nu \cdot \pi, \tag{2}$$

де S,H, S,B – номери частот спектральних складових корисного сигналу $S_M(j\omega_k)$, що відповідають його нижній $\omega_{S,H}$ та верхній $\omega_{S,B}$ граничним частотам; $k \in [0; (N_S / 2) - 1]$ – номер частоти спектральних складових вхідної суміші радіовипромінювань; $\omega_k / \omega_{S,H}$ – комплексна частотна характеристика відбілюючого фільтра; $\Delta\varphi_m(\omega_k)$ – різницевий фазовий спектр корисного сигналу; $U_1(\omega_k), U_2(\omega_k)$ – амплітудні спектри суміші корисного сигналу та шуму відповідно в першому та другому радіоканалах; ν – коефіцієнт корекції неоднозначності для функції $\arctg(\Delta\varphi_{1\gamma})$; $\nu = 0$ при $\cos(\Delta\varphi_{k_{S,H}}) > 0$; $\nu = -1$ при $\cos(\Delta\varphi_{k_{S,H}}) < 0$; $|\Delta\varphi_{k_{S,H}}| \leq \pi$.

В цьому випадку шумова складова дисперсії оцінки часу затримки $\sigma_{t_{\theta, \hat{a}}}^2$ при безошуковому спектральному кореляційно-інтерферометричному пеленгуванні не буде перевищувати величини [4, 12, 13]:

$$\sigma_{t_{\theta, \hat{a}}}^2 = \frac{1}{39,4 \cdot f_0^2 \cdot T_a \cdot \mu \cdot \Delta f_S}, \tag{3}$$

де f_0 – частота несучої сигналу в МГц; μ – відношення сигнал–шум; $\Delta f_S = \Delta\omega_S / 2\pi$ – ширина спектра корисного сигналу в МГц.

Розглянемо випадок, (рис. 1), коли смуга частот спектрів корисного сигналу і завади не перекриваються, але сигнал і завада не розділені по частоті і обробляються сумісно.

Нехай потужність завади P_z набагато більша потужності шумів P_n пеленгаційних каналів, тому шумові складові враховувати не будемо.

Для умов дії завади адитивні суміші $U_1(t)$ та $U_2(t)$ доцільно представити у спектральному цифровому вигляді згідно з рівнянням:

$$\begin{aligned} U_1(j\omega_k) &= S_{1M}(j\omega_k) + S_{1Z}(j\omega_k) \\ U_2(j\omega_k) &= S_{2M}(j\omega_k) + S_{2Z}(j\omega_k) \end{aligned} \quad (4)$$

де N_S – кількість часових відліків прийнятих сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$; $S_{1M}(j\omega_k) = S_{1M}(\omega_k) \cdot \exp(j\varphi_{1M}(\omega_k))$, $S_{2M}(j\omega_k) = S_{2M}(\omega_k) \cdot \exp(j\varphi_{2M}(\omega_k))$ – комплексні спектри корисних сигналів пеленгаційних каналів зі своїми амплітудними $S_{1M}(\omega_k)$, $S_{2M}(\omega_k)$ та фазовими $\varphi_{1M}(\omega_k)$, $\varphi_{2M}(\omega_k)$ частотними спектрами; $S_{1Z}(j\omega_k) = S_{1Z}(\omega_k) \cdot \exp(j\varphi_{1Z}(\omega_k))$, $S_{2Z}(j\omega_k) = S_{2Z}(\omega_k) \cdot \exp(j\varphi_{2Z}(\omega_k))$ – комплексні спектри завади в пеленгаційних каналах зі своїми амплітудними $S_{1Z}(\omega_k)$, $S_{2Z}(\omega_k)$ та фазовими $\varphi_{1Z}(\omega_k)$, $\varphi_{2Z}(\omega_k)$ спектрами.

Після спектрального аналізу формується взаємний спектр прийнятих сумішей згідно з рівнянням:

$$\begin{aligned} U_{12}(j\omega_k) &= [S_{1M}(j\omega_k) + S_{1Z}(j\omega_k)]^* \cdot [S_{2M}(j\omega_k) + S_{2Z}(j\omega_k)] = \\ &= S_{1M}^*(j\omega_k) \cdot S_{2M}(j\omega_k) + S_{1Z}^*(j\omega_k) \cdot S_{2Z}(j\omega_k). \end{aligned} \quad (5)$$

Аналіз рівняння (5) показує, що за рахунок відсутності перекриття спектрів сигналу та завади в результуючому відгуку будуть відсутні взаємні кореляційні складові корисного сигналу і завади, а взаємна кореляційна функція суміші сигналу та завади буде дорівнювати сумі автокореляційних функцій сигналу та завади.

Згідно з цифровим безпошуковим спектральним кореляційно-інтерферометричним методом пеленгування, взаємний спектр $U_{12}(j\omega_k)$ обробляється шляхом дисперсійного перетворення, та пряма максимально правдоподібна оцінка еквівалентного значення частотно-незалежного фазового зсуву $\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S,H})$ з урахуванням рівняння (2) визначається таким чином:

$$\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S,H}) = \arctg \left[\frac{\sum_{k=S.H}^{S.B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \sin[\Delta\varphi_{M\gamma}(\omega_k)] + \sum_{k=Z.H}^{Z.B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot S_Z^2(\omega_k) \cdot \sin[\Delta\varphi_{Z\gamma}(\omega_k)]}{\sum_{k=S.H}^B \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \cos[\Delta\varphi_{M\gamma}(\omega_k)] + \sum_{k=Z.H}^{Z.B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot S_Z^2(\omega_k) \cdot \cos[\Delta\varphi_{Z\gamma}(\omega_k)]} \right] + \nu \cdot \pi, \quad (6)$$

де $Z.H$, $Z.B$ – номери частот спектральних складових завади $S_Z(j\omega_k)$, що відповідають його нижній $\omega_{Z,H}$ та верхній $\omega_{Z,B}$ граничним частотам; $S_{1M}^2(\omega_k)$ – взаємний амплітудний спектр корисного сигналу; $S_Z^2(\omega_k)$ – взаємний амплітудний спектр завади; $\Delta\varphi_{S\gamma}(\omega_k)$ – дисперсійно оброблений різницевий фазовий спектр корисного сигналу; $\Delta\varphi_{Z\gamma}(\omega_k)$ – дисперсійно оброблений різницевий фазовий спектр завади.

В цьому випадку взаємодію сигналу та завади доцільно представити у векторній формі, (рис. 4).

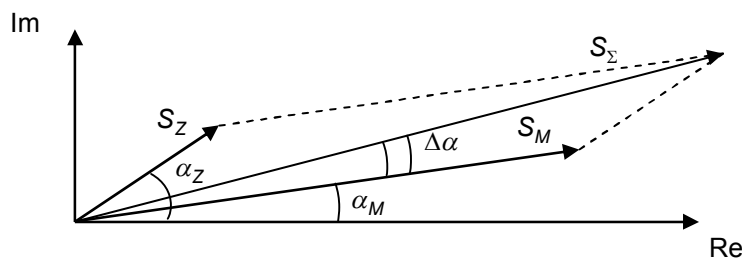


Рис. 4. Векторна сума корисного сигналу і завади

На рисунку 4 позначено:

$$S_Z = \left| \sum_{k=Z.H}^{Z.B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot S_Z^2(\omega_k) \cdot \exp[j\Delta\varphi_{Z\gamma}(\omega_k)] \right|,$$

$$S_M = \left| \sum_{k=S.H}^{S.B} \frac{\omega_k}{\omega_{S.H}} \cdot S_M^2(\omega_k) \cdot \exp[\Delta\varphi_{M\gamma}(\omega_k)] \right| - \text{довжини сумарних векторів відповідно до}$$

завади та корисного сигналу; S_Z – довжина результуючого вектора суміші завади та корисного сигналу; $\alpha_M(\tau_S)$, $\alpha_Z(\tau_Z)$ – кути нахилу відповідно до сигнального та заводового сумарних векторів; $\Delta\alpha$ – кут похибки, тобто відхилення вектора S_Z від S_M .

Виконаємо оцінку максимальної похибки пеленгування із врахуванням дії завади. Для цього визначимо кут $\Delta\alpha$. За теоремою синусів із рисунку 4 маємо [14]:

$$\frac{S_Z}{\sin(\Delta\alpha)} = \frac{S_M}{\sin(\alpha_Z - \alpha_M - \Delta\alpha)}. \quad (7)$$

З рівняння (7) значення $\Delta\alpha$ визначається рівнянням:

$$\Delta\alpha = \arctg\left(\frac{S_Z \cdot \sin(\alpha_Z - \alpha_M)}{S_M + S_Z \cdot \cos(\alpha_Z - \alpha_M)}\right). \quad (8)$$

Виконаємо аналіз максимального значення похибки пеленгування в залежності від величини різницевого кута $(\alpha_Z - \alpha_M)$. Для цього розв'яжемо таке рівняння:

$$\frac{d(\Delta\alpha)}{d(\alpha_Z - \alpha_M)} = 0. \quad (9)$$

Розв'язком рівняння (9) є значення $\alpha_Z - \alpha_M = \pm 90^\circ$. В результаті максимальна похибка пеленгування з урахуванням (8) дорівнює:

$$\Delta\alpha = \arctg(S_Z / S_M) = \Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S.H}) - \alpha_M. \quad (10)$$

Аналіз рівняння (10) показує, що максимальна похибка оцінки напрямку на ДРВ безпошуковим спектральним кореляційно-інтерферометричним радіопеленгатором пропорційна відношенню модулів сумарних векторів прийнятих сигналу та завади. Отримана в рівнянні (6) оцінка $\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S.H})$ відповідає глобальному максимуму сукупності можливих значень взаємної кореляційної функції прийнятих пеленгаційними каналами сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$. Тому заводостійкість досліджуваного безпошукового методу співпадає із заводостійкістю ітераційного кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора [13]. Однак, на відміну від ітераційного, безпошуковий метод пеленгування не дає можливості отримати оцінку інших відліків взаємної кореляційної функції, в тому числі і тих, що відповідають її локальним заводовим екстремумам. Отримана оцінка $\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S.H})$ буде відповідати сигнальному екстремуму взаємної кореляційної функції за умови, коли модуль сигнального вектора буде більше модуля заводового вектора $S_M > S_Z$. В протилежному випадку, коли $S_M < S_Z$, отримана оцінка $\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S.H})$ буде відповідати заводовому екстремуму взаємної кореляційної функції.

Також аналіз рівняння (6), (10) та виразів для S_Z та S_M показує, що при безпошуковому кореляційно-інтерферометричному пеленгуванні здійснюється одночасне накопичення енергії корисного сигналу та завади. Тому похибка пеленгування, що зумовлюється дією завади не може бути зменшена шляхом збільшення часу аналізу T_a на відміну від випадку дії тільки власних шумів згідно з рівнянням (3). Таким чином, похибка пеленгування при дії завади може бути зменшена тільки за рахунок збільшення потужності корисного сигналу, або попередньої частотної чи просторової селекції завади.

Розглянемо випадок, (рис. 2), коли смуга частот спектрів корисного сигналу і завади перекриваються і співпадають, а завада корельована з корисним сигналом та сформована в результаті перевідбиття.

Нехай $P_Z \gg P_n$, тому шумові складові похибки пеленгування враховувати не будемо. В цьому випадку радіоканали приймають такі суміші сигналу та завади:

$$\begin{aligned} U_1(j\omega_k) &= S_{1M}(j\omega_k) + S_{1Z}(j\omega_k); \\ U_2(j\omega_k) &= S_{1M}(j\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \tau_S) + S_{2Z}(j\omega_k), \end{aligned} \quad (11)$$

де K_V – коефіцієнт послаблення по амплітуді завади на трасі перевідбиття; $S_{1Z}(j\omega_k) = K_V \cdot S_{1M}(j\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \Delta\tau_Z)$ – спектр завади в першому радіоканалі; $S_{2Z}(j\omega_k) = K_V \cdot S_{1M}(j\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot (\Delta\tau_Z + \tau_Z))$ – спектр завади в другому радіоканалі; $\Delta\tau_Z$ – апріорі невідома затримка завади відносно корисного сигналу в першому пеленгаційному каналі, що є випадковою величиною з рівномірним розподілом густини ймовірності в інтервалі $[0; \Delta\tau_{Z,max}]$.

Після спектрального аналізу прийнятих сумішей формується взаємний спектр згідно з рівнянням:

$$\begin{aligned}
 U_{12}(j\omega_k) &= [S_{1M}(j\omega_k) + K_V \cdot S_{1M}(j\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \Delta\tau_Z)]^* \cdot \\
 & [S_{1M}(j\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \tau_S) + K_V \cdot S_{1M}(j\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot (\Delta\tau_Z + \tau_Z))] = \\
 & = S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \tau_S) + K_V \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot (\Delta\tau_Z + \tau_Z)) + \\
 & + K_V \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(j\omega_k \cdot (\Delta\tau_Z - \tau_S)) + K_V^2 \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \tau_Z).
 \end{aligned} \tag{12}$$

де $S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \tau_S) = S_M(j\omega_k)$ – взаємний спектр корисного сигналу; $-$ взаємний $K_V \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot (\Delta\tau_Z + \tau_Z)) + K_V^2 \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \tau_Z) + K_V \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(j\omega_k \cdot (\Delta\tau_Z - \tau_S)) = S_Z(j\omega_k)$ – спектр сумарної завади.

Аналіз рівняння (12) показує, що взаємний спектр $U_{12}(j\omega_k)$ прийнятих сумішей можливо представити як адитивну суміш взаємних спектрів корисного сигналу $S_M(j\omega_k)$ та сумарної завади $S_Z(j\omega_k)$. Взаємний спектр сумарної завади $S_Z(j\omega_k)$, в свою чергу, складається з трьох доданків, що відрізняються від взаємного спектра корисного сигналу коефіцієнтом послаблення за амплітудою та значенням аргументу, що є лінійною функцією від частоти. Тому аргумент взаємного спектра $U_{12}(j\omega_k)$ прийнятої суміші також буде лінійною функцією від частоти з коефіцієнтом пропорційності, що дорівнює еквівалентній відносній затримці τ_U прийому пеленгаційними каналами:

$$U_{12}(j\omega_k) = U_{12}(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \tau_U). \tag{13}$$

Модуль взаємного спектра сумішей $U_{12}(\omega_k)$ та еквівалентна відносна затримка τ_U визначаються векторною сумою складових рівняння (12).

Згідно з цифровим безпошуковим спектральним кореляційно-інтерферометричним методом пеленгування взаємний спектр $U_{12}(j\omega_k)$ обробляється шляхом дисперсійного перетворення, та пряма максимально правдоподібна оцінка еквівалентного значення частотно-незалежного фазового зсуву $\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S,H})$ з урахуванням рівняння (2) визначається таким чином:

$$\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S,H}) = \arctg \left[\frac{\sum_{k=S.H}^{S.B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \sin[\Delta\varphi_{M_T}(\omega_k)] + \sum_{k=S.H}^{S.B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot S_Z^2(\omega_k) \cdot \sin[\Delta\varphi_{Z_T}(\omega_k)]}{\sum_{k=S.H}^{S.B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \cos[\Delta\varphi_{M_T}(\omega_k)] + \sum_{k=S.H}^{S.B} \frac{\omega_k}{\omega_{S,H}} \cdot S_Z^2(\omega_k) \cdot \cos[\Delta\varphi_{Z_T}(\omega_k)]} \right] + \nu \cdot \pi. \tag{14}$$

В результаті взаємодії корисного сигналу та корельованої завади можливо представити як векторну суму корисного сигналу та сумарної завади аналогічно до рисунку 4. Враховуючи це, максимальна похибка пеленгування $\Delta\alpha$ під час дії корельованої завади з урахуванням рівняння (10) буде визначатися таким чином:

$$\Delta\alpha = \arctg(S_Z / S_M), \tag{15}$$

де $S_M = \left| \sum_{k=S.H}^{S.A} S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \tau_S) \right|;$

$$S_Z = \left| \sum_{k=S.H}^{S.B} \left[K_V \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot (\Delta\tau_Z + \tau_Z)) + K_V \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(j\omega_k \cdot (\Delta\tau_Z - \tau_S)) + \right. \right. \\ \left. \left. + K_V^2 \cdot S_{1M}^2(\omega_k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \tau_Z) \right] \right|.$$

Аналіз рівнянь (14), (15) показує, що максимальна похибка оцінки напрямку на ДРВ безпошуковим спектральним кореляційно-інтерферометричним радіопеленгатором під час дії корельованої завади пропорційна відношенню модулів сумарних векторів прийнятих сигналу та завади. Отримана в рівнянні (14) оцінка $\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S,H})$ відповідає глобальному максимуму сукупності можливих значень взаємної кореляційної функції прийнятих пеленгаційними каналами сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$. Тому завадостійкість досліджуваного безпошукового методу в цьому випадку співпадає із завадостійкістю ітераційного кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора [13]. Отримана оцінка $\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S,H})$ буде відповідати сигнальному екстремуму взаємної кореляційної функції за умови, коли модуль сигнального вектора буде більше модуля завадового вектора $S_M > S_Z$. В протилежному випадку, коли $S_M < S_Z$, отримана оцінка $\Delta\hat{\varphi}_e(\omega_{S,H})$ буде відповідати завадовому екстремуму взаємної кореляційної функції.

Також аналіз рівняння (14), (15) показує, що при безпошуковому кореляційно-інтерферометричному пеленгуванні здійснюється одночасне накопичення енергії корисного сигналу та завади. Тому похибка пеленгування, що зумовлюється дією корельованої завади також не може бути зменшена шляхом збільшення часу аналізу T_a , на відміну від випадку дії тільки власних шумів, згідно з рівнянням (3).

Порівняльний аналіз виразів (10) та (15) показує, що завадостійкість, при дії корельованої завади, значно менша, порівняно з частотно рознесеною завадою за рахунок дії взаємних кореляційних складових сигналу та завади. При цьому, похибка пеленгування під дією корельованої завади може бути зменшена за рахунок збільшення потужності корисного сигналу, використання попередньої частотної чи просторової селекції завади.

Таким чином, для розглянутих випадків завадостійкість безпошукового спектрального методу кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування співпадає із завадостійкістю ітераційного кореляційно-інтерферометричного методу пеленгування при значно вищій швидкодії. Значне погіршення завадостійкості пошукового методу виникає за умови дії потужної завади, що попередньо не селекується. Підвищення завадостійкості доцільно здійснювати попередньою частотною, просторовою або поляризаційною селекцією, наприклад, із використанням АР [2, 5].

Висновки. В результаті проведеного аналізу отримано аналітичні співвідношення похибки пеленгування безпошукового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з двоелементною антенною решіткою для умов дії частотно рознесеної та частотно суміщеної завади. Визначено, що збільшення тривалості часу аналізу не забезпечує покращення завадостійкості безпошукового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора. Завадостійкість безпошукового спектрального методу кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування співпадає із завадостійкістю ітераційного кореляційно-інтерферометричного методу пеленгування при значно вищій швидкодії. Підвищення завадостійкості доцільно здійснювати попередньою частотною, просторовою або поляризаційною селекцією, наприклад, із використанням багатоелементних антенних решіток.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку. В подальшому доцільно дослідити імовірнісні характеристики завадостійкості безпошукового спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора при дії різного типу завад та з використанням багатоелементних антенних решіток.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Слободянюк П.В. Довідник з радіомоніторингу / П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарний, В.С. Ступак ; за заг. ред. П.В. Слободянюка. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.
2. Современные корреляционно-интерференционные измерители пеленга и напряженности электромагнитного поля / А.В. Ашихмин // Специальная техника. Специальный выпуск. – 2002.
3. Белавин О.В. Основы радионавигации : учеб. пособие / О.В. Белавин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Сов. Радио, 1977. – 320 с
4. Ципоренко В.В. Метод кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з дисперсійною обробкою комплексних взаємних спектрів сигналів / В.В. Ципоренко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» : серія Радіотехніка. Радіоапаратуробудування. – 2010. – Вип. 42. – 205 с. – С. 26–37.
5. 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.
6. Теория и методы оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Ю.А. Феоктистов, В.В. Матасов, Л.И. Башурин, В.И. Селезнев ; под ред. Ю.А. Феоктистова. – М. : Радио и связь, 1988. – 216 с. : ил.
7. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка / Ю.А. Смирнов. – М. : Воениздат, 2001. – 456 с.
8. Комиссаров Ю.А. Помехоустойчивость и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Ю.А. Комиссаров, С.С. Родионов. – К. : Техника, 1978. – 208 с.
9. Обнаружение радиосигналов / П.С. Акимов, Ф.Ф. Евстратов, С.И. Захаров и др. ; под ред. А.А. Колосова. – М. : Радио и связь, 1989. – 288 с. : ил.
10. Трифонов А.П. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех / А.П. Трифонов, Ю.С. Шинаков. – М. : Радио и связь, 1985. – 263 с. : ил.
11. Старик М.Е. Основы радиопеленгации / М.Е. Старик, И.С. Кукес. – М. : Сов. радио, 1964. – 640 с.
12. Караваев В.В. Статистическая теория пассивной локации / В.В. Караваев, В.В. Сазанов. – М. : Радио и связь, 1987. – 240 с.
13. Караваев В.В. К теории интерферометра / В.В. Караваев, В.В. Сазанов. – Радиотехника и электроника. – 1971. – Т. 16, № 12. – С. 2303–2308.
14. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – 13-е изд., испр. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.

ЦИПОРЕНКО Віталій Валентинович – доцент кафедри радіотехніки та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– виявлення та пеленгування радіовипромінювань із використанням цифрових методів оброблення.

ЦИПОРЕНКО Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– радіоелектроніка з використанням цифрового оброблення сигналів.

Подано 28.01.2011