

УДК 621.37:621.391

**ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗПОШУКОВОГО ЦИФРОВОГО
КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО
РАДІОПЕЛЕНГАТОРА З ПОДВІЙНИМ КОРЕЛЯЦІЙНО-
ЗГОРТКОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ¹**

*Ципоренко В. В., к.т.н., доцент; Ципоренко В. Г., к.т.н., доцент
Житомирський державний технологічний університет,
м. Житомир, Україна*

**RESEARCH OF DIRECT DIGITAL CORRELATION-INTERFEROMETER
DIRECTION-FINDER WITH DOUBLE CORRELATION-CONVOLUTIONAL
PROCESSING**

*Tsyoporenko V. V. Cand. Of Sci (Technics), Associate professor;
Tsyoporenko V. G. Cand. Of Sci (Technics), Associate professor
Zhytomyr State Technological University*

Вступ

Перспективним напрямком реалізації систем радіомоніторингу в умовах складної електромагнітної обстановки є використання цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, у тому числі безпошукових [1–3]. Тому дослідження та оптимізація цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів за швидкодією та точністю є актуальною науковою задачею.

У роботі [4] запропоновано безпошуковий цифровий метод спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з подвійним кореляційним обробленням. Даний метод забезпечує використання антенної бази набагато більшої за довжину хвилі, що дозволяє суттєво підвищити точність пеленгування. Однак параметричну оптимізацію такого пеленгатора в роботі не проведено.

У роботах [5–8] досліджено ефективність та проведено оптимізацію сучасних алгоритмів оцінки напрямку на джерело радіовипромінювання (ДРВ) з використанням антенної решітки (АР), визначені оптимальні оцінки просторових параметрів радіовипромінювань. Однак в даних роботах не досліджені питання оптимізації безпошукових кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів з використанням подвійного кореляційно-згорткового оброблення. Тому отримані результати не можуть бути безпосередньо використані для вирішення даної задачі.

Таким чином, невирішеною частиною загальної проблеми дослідження безпошукових цифрових методів кореляційно-інтерферометричного радіо-

¹ <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1199>

пеленгування є параметрична оптимізація безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з подвійним кореляційно-згорткового обробленням.

Мета статті – параметрична оптимізація безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з подвійним кореляційно-згортковим обробленням за точністю пеленгування.

Обґрунтування задачі оптимізації

Виконаємо параметричну оптимізацію безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора [4] з використанням подвійного кореляційно-згорткового оброблення за точністю пеленгування.

Нехай в горизонтальній площині з випадкового невідомого напрямку θ приймається неперервне випадкове стаціонарне гаусове радіовипромінювання $S(t)$ точкового ДРВ з рівномірним енергетичним спектром $S^2(\omega)$ шириною $\Delta\omega_S$ двоелементною АР радіопеленгатора. Елементи АР рознесені у просторі на величину d антенної бази і підключені до двох відповідних ідентичних радіоканалів пеленгатора, що мають власні адитивні гаусові стаціонарні шуми $n_1(t)$ і $n_2(t)$ з нульовим математичним очікуванням і однаковою спектральною густиною потужності N , постійною в межах смуги Δf_k пропускання радіоканалів пеленгатора. Будемо вважати, що власні шуми радіоканалів пеленгатора не мають міжканальної кореляції та кореляції з випромінюванням $S(t)$, ДРВ, яке пеленгується, знаходиться в дальній зоні, а фазові флуктуації на шляху поширення випромінювання $S(t)$ відсутні. Представимо початкові умови досліджень наступним чином:

$$\begin{aligned}U_1(t) &= S_1(t) + n_1(t); \\U_2(t) &= S_2(t) + n_2(t); \\S_2(t) &= S_1(t - \tau_S),\end{aligned}\tag{1}$$

де $U_1(t)$, $U_2(t)$ – адитивні суміші сигналів $S_1(t)$ і $S_2(t)$ та шумів $n_1(t)$ і $n_2(t)$ радіоканалів пеленгатора;

τ_S – априорі невідома затримка радіовипромінювання, що є випадковою величиною з рівномірним розподілом густини ймовірності на інтервалі $[0; \tau_{S \max} < T_a]$;

T_a – тривалість процесу аналізу радіовипромінювання.

Згідно досліджуваного методу пеленгування оцінка $\hat{\theta}$ напрямку на ДРВ здійснюється наступним чином:

$$\hat{\theta} = \arccos(c \cdot \hat{\tau}_3 / d),\tag{2}$$

де $\hat{\tau}_3 = \Delta\xi / \Delta\omega_{3C}$ – оцінка екстремального значення компенсуючої затримки;

$$\Delta\xi = \arctg \left[\frac{\sum_{k=k_H}^{k_B} U_{D2}(\omega_{ПЧ.k}) \cdot \sin[\Delta\phi_{\Delta.k}]}{\sum_{k=k_H}^{k_B} U_{D2}(\omega_{ПЧ.k}) \cdot \cos[\Delta\phi_{\Delta.k}]} \right] + \nu \cdot \pi \quad - \text{еквівалентний фазо-}$$

вий зсув між сигналами $S_1(t)$ та $S_2(t)$;

k_H, k_B – номери частотних складових спектра випромінювання на проміжній частоті, що відповідають його нижній $\omega_{ПЧ.H}$ та верхній $\omega_{ПЧ.B}$ граничним частотам відповідно;

$\Delta\omega_{3C}$ – частотний перетворювальний зсув реалізацій спектра випромінювання ДРВ, що пеленгується;

c – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі;

$U_{D2}(\omega_{ПЧ.k})$ – модуль другого добутку спектрів реалізацій випромінювання ДРВ, що пеленгується, отримані на проміжній $\omega_{ПЧ}$ частоті;

$\Delta\phi_{\Delta.k} = \Delta\phi(\omega_{ПЧ.k} + \Delta\omega_{3C}) - \Delta\phi(\omega_{ПЧ.k})$ – різницевий фазовий спектр другого добутку спектрів сигналів $S_1(t)$ та $S_2(t)$;

ν – коефіцієнт корегування неоднозначності для функції $\arctg(\cdot)$: $\nu = 0$ при $\cos(\Delta\phi) > 0$; $\nu = -1$ при $\cos(\Delta\phi) < 0$.

Як основний показник точності пеленгування доцільно використовувати дисперсію σ_θ^2 похибки оцінки напрямку на ДРВ [2, 3], яка з урахуванням умов (1) визначається для досліджуваного методу пеленгування (2) згідно з рівнянням [6, 7]:

$$\sigma_\theta^2 = \frac{2\pi \cdot c^2}{q_{ex}^2 \cdot \Delta\omega_{3C}^2 \cdot \Delta\omega_a \cdot T_a \cdot K_w \cdot d^2 \cdot \sin^2 \theta}, \quad (3)$$

де q_{ex} – відношення сигнал/шум на вході пеленгаційних каналів АР;

$\Delta\omega_a$ – ширина смуги аналізу при подвійному кореляційному обробленні;

K_w – коефіцієнт шуму вагової функції «вікна» цифрового спектрального аналізу.

З урахуванням (3) загальний критерій Q оптимальності пеленгатора доцільно визначити за мінімумом дисперсії σ_θ^2 похибки оцінки напрямку на ДРВ:

$$Q = \min \sigma_\theta^2. \quad (4)$$

Для реалізації оптимізації радіопеленгатора, що розглядається, визначимо вид цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$ формування другого добутку

$U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів [8] наступним чином:

$$F(\Delta\omega_{3C}) = f(\Delta\omega_{3C}, \Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})) = \Delta\omega_{3C}^2 \cdot \Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C}). \quad (5)$$

З урахуванням рівняння (5) для забезпечення умови оптимізації (4) значення цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$ повинно мати екстремум типу \max :

$$\max F(\Delta\omega_{3C}) = \max \left[\Delta\omega_{3C}^2 \Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C}) \right]. \quad (6)$$

Для подальшої оптимізації пеленгатора за точністю виконаємо аналіз особливостей формування другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів і відповідної смуги $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})$ аналізу та виберемо модель їх формування.

В роботі [4] запропонована кореляційна модель формування другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів і смуги $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})$ аналізу.

Суттєвим недоліком кореляційної моделі формування другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів є обмеженість максимально досяжного значення частотного перетворювального зсуву $\Delta\omega_{3C}$ і відповідні втрати за точністю пеленгування [6]. Для усунення вказаного недоліку кореляційної моделі доцільне використання як альтернативи згорткової моделі формування другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів.

Епюри формування другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів для згорткової моделі його формування наведені на рис. 1.

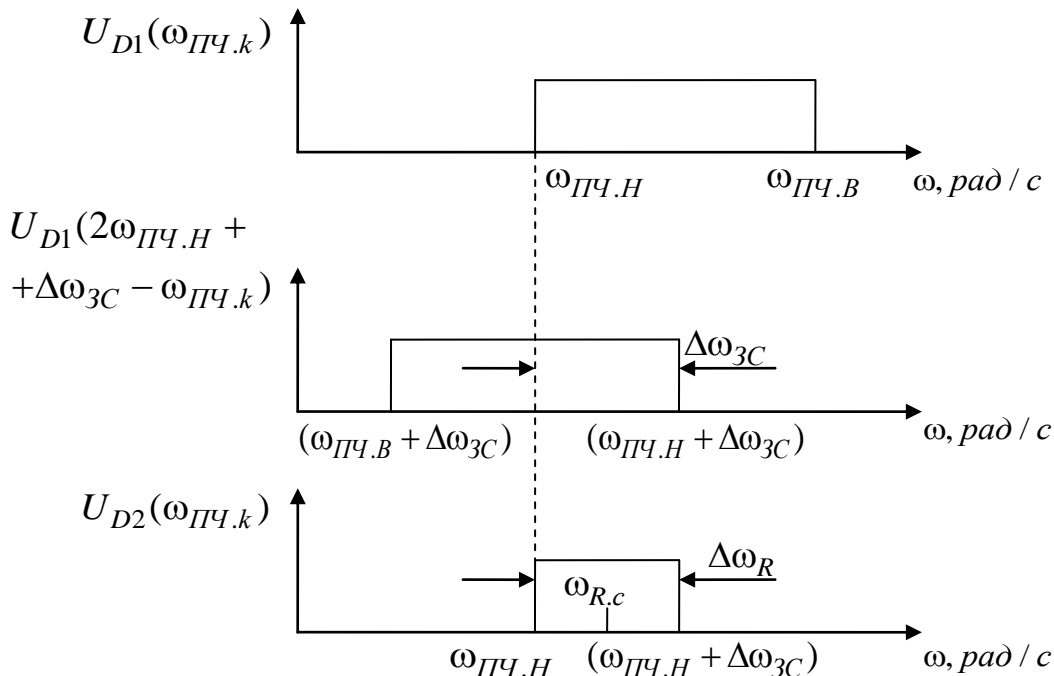


Рис. 1. Епюри формування другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів для згорткової моделі

Згорткова модель представляє процес формування другого добутку

$U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів як дію відповідного узгодженого з першим добутком $U_{D1}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів фільтра з імпульсною характеристикою $h_f(j\omega)$ в частотній області визначення:

$$h_f(j\omega) = U_{D1}(j\omega_{ПЧ.k}). \quad (7)$$

Таким чином, другий добуток $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів відповідає реакції узгодженого фільтра і формується на основі операції згортки шляхом перемноження комплексно спряженого першого добутку $U_{D1}^*(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів та його реалізації $U_{D1}(j(\Delta\omega_p \pm \Delta\omega_{3C} - \omega_{ПЧ.k}))$, що дзеркально відображена відносно нульової $\omega_k = 0$ частоти та зсунута за частотою на величину $(\Delta\omega_p \pm \Delta\omega_{3C})$ [9]:

$$U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k}) = U_{D1}^*(j\omega_{ПЧ.k}) \cdot U_{D1}(j(\Delta\omega_p \pm \Delta\omega_{3C} - \omega_{ПЧ.k})), \quad (8)$$

де $\Delta\omega_p = \begin{cases} 2\omega_{ПЧ.H}, \text{ при } (\Delta\omega_{3C} \geq 0) \\ 2\omega_{ПЧ.H} + 2\Delta\omega_S, \text{ при } (\Delta\omega_{3C} < 0) \end{cases}$.

Аналіз рис. 1 та рівняння (8) показує, що величина смуги $\Delta\omega_R$ перекриття має область значень $[0; \Delta\omega_S]$ при $\Delta\omega_{3C} \in [0; \Delta\omega_S]$ і досягає максимального значення за умови:

$$\max \Delta\omega_R = \max |\Delta\omega_{3C}| = \Delta\omega_S. \quad (9)$$

Конкретизуємо залежність смуги $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})$ аналізу від величини $\Delta\omega_{3C}$ частотного перетворювального зсуву [4, 7]:

$$\Delta\omega_a = \frac{|\Delta\omega_{3C}|}{2} \cdot \int_{\omega_{R.c} - |\Delta\omega_{3C}|/2}^{\omega_{R.c}} K_\gamma(\omega) d\omega = \frac{|\Delta\omega_{3C}|}{2} \cdot \int_0^1 \omega^2 d\omega = |\Delta\omega_{3C}| / 6, \quad (10)$$

де $K_\gamma(\omega_{ПЧ}) = [2 \cdot |\omega_{ПЧ} - \omega_{R.c}| / \Delta\omega_R]^2$ – модуль коефіцієнта дисперсійного оброблення другого добутку спектрів.

Аналіз рівнянь (7)–(10) показує, що при використанні згорткової моделі формування другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів величина смуги $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})$ аналізу пропорційна модулю $|\Delta\omega_{3C}|$ частотного перетворювального зсуву з діапазоном можливих значень $[0; \Delta\omega_S]$.

Таким чином, з урахуванням рівнянь (6) і (10) визначимо цільову функцію $F(\Delta\omega_{3C})$ для згорткової моделі наступним чином:

$$F(\Delta\omega_{3C}) = \Delta\omega_{3C}^2 \cdot |\Delta\omega_{3C}| / 6 = |\Delta\omega_{3C}|^3 / 6. \quad (11)$$

Аналіз рівняння (11) показує, що цільова функція $F(\Delta\omega_{3C})$ є показниковою функцією третього порядку від значення модуля $|\Delta\omega_{3C}|$ частотного

перетворювального зсуву.

Вирішення задачі оптимізації

З урахуванням рівнянь (6) і (11) визначимо рівняння оптимізації (вид цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$ і критерій оптимальності) для згорткової моделі наступним чином:

$$\max F(\Delta\omega_{3C}) = \max |\Delta\omega_{3C}|^3 / 6. \quad (12)$$

Розв'язком рівняння (12) є оптимальне значення $\Delta\omega_{3C.opt1}$.

Для подальшої оптимізації і визначення розв'язку рівняння (12) визначимо кількість L і значення $f_l(X)$ функцій зв'язку, а також вид шуканих екстремумів цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$.

З урахуванням особливостей досліджуваного методу пеленгування [4] та алгоритму швидкого перетворення Фур'є [10] перша $f_1(N_C)$, друга $f_2(N_k)$, третя $f_3(\Delta\omega_{3C})$ та четверта $f_4(\Delta\omega_{3C})$ функції зв'язку мають вигляд:

$$\begin{aligned} f_1(N_C) &= N_C = 1; \\ f_2(N_k) &= N_k = 1; \\ f_3(\Delta\omega_{3C}) &= -\Delta\omega_S < \Delta\omega_{3C} < \Delta\omega_S; \\ f_4(\Delta\omega_{3C}) &= |\Delta\omega_{3C}| = k \cdot 2\pi / T_a, \end{aligned} \quad (13)$$

де N_C, N_k – кількість циклів кореляційного оброблення та кількість кореляторів відповідно;

$k = 0, 1, \dots$ – цілі додатні числа.

З урахуванням рівнянь (12) і (13) можливо зробити висновок, що оптимізація повинна здійснюватись з урахуванням чотирьох $L = 4$ функцій зв'язку і пошуком глобального умовного екстремуму.

Враховуючи визначені початкові умови та особливість аналітичного представлення цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$, поставлену задачу оптимізації доцільно вирішити з використанням скалярного методу та нелінійного програмування [8, 11].

Для отримання розв'язку рівняння (12) оптимізації виконаємо аналіз особливостей цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$. З рівняння (13) бачимо, що діапазон області визначення цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$ є обмеженим значеннями $[-\Delta\omega_S; \Delta\omega_S]$, а уся множина можливих значень цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$ буде додатною:

$$F(\Delta\omega_{3C}) \in [0; |\Delta\omega_{3C}|^3 / 6] \geq 0. \quad (14)$$

Оцінимо монотонність цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$ за характером її першої похідної [11]:

$$\frac{dF(|\Delta\omega_{3C}|)}{d|\Delta\omega_{3C}|} = \frac{|\Delta\omega_{3C}|^2}{2} \geq 0. \quad (15)$$

Аналіз рівняння (15) показує, що цільова функція $F(\Delta\omega_{3C})$ є унімодалльною і монотонною в межах кожного з двох піддіапазонів області визначення: $[-\Delta\omega_S; 0]$ та $[0; \Delta\omega_S]$. Також цільова функція $F(\Delta\omega_{3C})$ є парною і її значення розподілені симетрично відносно свого нульового значення $F(0) = 0$: $F(\Delta\omega_{3C}) = F(-\Delta\omega_{3C})$.

Враховуючи усі особливості (14)–(15) цільової функції $F(\Delta\omega_{3C})$, можливо стверджувати, що вона має два глобальних умовних екстремуми типу \max [11], що відповідають двом межовим значенням $\Delta\omega_{3C.opt1} = \Delta\omega_S$ і $\Delta\omega_{3C.opt2} = -\Delta\omega_S$ її області визначення:

$$\begin{aligned} \max F(\Delta\omega_{3C}) &= F(\Delta\omega_S) = \frac{1}{6} |\Delta\omega_{3C}|^3 \Big|_{\Delta\omega_{3C} \in [0; \Delta\omega_S]}; \\ \max F(-\Delta\omega_{3C}) &= F(-\Delta\omega_S) = \frac{1}{6} |\Delta\omega_{3C}|^3 \Big|_{\Delta\omega_{3C} \in [-\Delta\omega_S; 0]}. \end{aligned} \quad (16)$$

Аналіз співвідношень (16) показує, що оптимальним значенням $\Delta\omega_{3C.opt}$ частотного перетворювального зсуву є його максимальне за модулем значення, що відповідає умові повного перекриття за частотою спектрів-множників другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$ спектрів: $|\Delta\omega_{3C.opt}| = \Delta\omega_S$.

Результати моделювання

Проведені програмне моделювання роботи пеленгатора відповідно (2) та дослідження його точності за допомогою розробленої програмної моделі пеленгатора в середовищі MathCad для наступних початкових умов: тип випромінювання – неперервний з лінійною частотною модуляцією: $S(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 t + bt^2)$; ширина спектра випромінювання $\Delta f_S = 5\text{МГц}$; смуга частот аналізу пеленгаційного радіоканалу $\Delta f_k = 10\text{МГц}$; робоча частота випромінювання $f_0 = 2\text{ГГц}$; значення частоти дискретизації $f_d = 2\Delta f_k = 20\text{МГц}$; кількість часових відліків, що накопичується та аналізується: $N_S = 16384$; тривалість процесу аналізу $T_a = 0,8\text{мс}$; напрямок на ДРВ $\theta = 60^\circ$; величина бази АР $d = 40\text{м}$; кількість m дослідів для оцінки одного відліку σ_θ дорівнює $m = 50$.

В результаті моделювання отримано сімейство залежностей середньоквадратичного відхилення (СКВ) σ_θ похибки оцінки пеленгу від відношен-

ня $q_{\text{вх}}$ сигнал/шум на вході пеленгаційних радіоканалів для кореляційної та згорткової моделей формування другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ,k})$ спектрів.

На рис. 2 наведено результати моделювання: ряд 1 – для зсуву $\Delta\omega_{3C} = \Delta\omega_S / 2$ згорткової моделі; ряд 2 – для оптимального зсуву $\Delta\omega_{3C} = \Delta\omega_S$ згорткової моделі; ряд 3 – для частотного перетворювального зсуву $\Delta\omega_{3C} = \Delta\omega_S / 2$ кореляційної моделі.

Аналіз результатів моделювання на рис. 2 показує, що похибка σ_θ пеленгування при використанні алгоритму з подвійним кореляційним обробленням суттєво залежить від типу моделі та значення $\Delta\omega_{3C}$ частотного перетворювального зсуву. При виборі частотного перетворювального зсуву $\Delta\omega_{3C.opt} = |\Delta\omega_S|$ для згорткової моделі формування другого добутку $U_{D2}(j\omega_{ПЧ,k})$ спектрів забезпечується мінімальне значення СКВ оцінки пеленгу, що узгоджується з результатами аналітичної оптимізації. Порівняння результатів ряд 2 та ряд 3 показує суттєве, до 30% покращення точності порівняно з кореляційною моделлю.

При цьому для оптимального значення $\Delta\omega_{3C.opt} = |\Delta\omega_S|$ частотного перетворювального зсуву при відношенні сигнал/шум $q_{\text{вх}} \in [0; 30]$ дБ СКВ оцінки пеленгу для заданих початкових умов моделювання лежить в межах $\sigma_\theta \in [1,3; 0,03]^\circ$ відповідно.

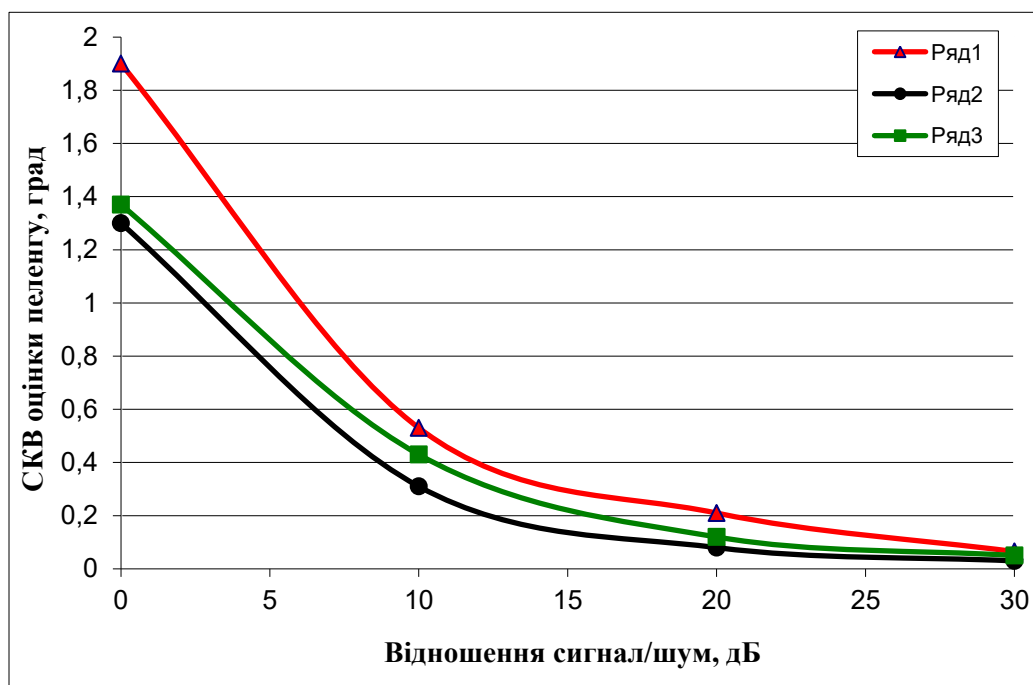


Рис. 2. Сімейство залежностей СКВ σ_θ оцінки пеленгу від відношення сигнал/шум при різних моделях та значеннях $\Delta\omega_{3C}$ частотного перетворювального зсуву

Висновки

В результаті проведених досліджень і параметричної оптимізації безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з подвійним кореляційно-згортковим обробленням за точністю пеленгування виконано аналіз залежності СКВ оцінки пеленгу від значення $\Delta\omega_{3C}$ частотного перетворювального зсуву для згорткової моделі його формування. Показано, що похибка σ_θ пеленгування суттєво залежить від значення $\Delta\omega_{3C}$ частотного перетворювального зсуву. Виконано параметричну оптимізацію пеленгатора за величиною $\Delta\omega_{3C}$ частотного перетворювального зсуву та показано, що похибка σ_θ пеленгування має мінімум при $|\Delta\omega_{3C.opt}| = \Delta\omega_S$.

Проведено програмне моделювання роботи досліджуваного радіопеленгатора та оцінена його точність. Результати моделювання узгоджуються з результатами параметричної оптимізації. Отримані в результаті моделювання залежності СКВ оцінки пеленгу від відношення q_{ex} сигнал/шум показали, що при застосуванні оптимального значення $|\Delta\omega_{3C.opt}| = \Delta\omega_S$ частотного перетворювального зсуву та згорткової моделі досліджуваній метод пеленгування забезпечує можливість безпошукової оцінки напрямку на ДРВ з широкосмуговими випромінюваннями з СКВ оцінки пеленгу $\sigma_\theta \in [1,3; 0,03]^\circ$ при відношенні сигнал/шум $q_{ex} \in [0; 30]$ дБ відповідно.

В подальшому доцільно виконати дослідження радіопеленгатора для різних конфігурацій антенної решітки.

Перелік посилань

1. Introduction into Theory of Direction Finding // Rohde & Schwarz Radiomonitoring and Radiolocation, Catalog 2011/2012.
2. Слободянюк П. В. Довідник з радіомоніторингу / П. В. Слободянюк, В. Г. Благодарний, В. С. Ступак; під заг. ред П. В. Слободянюка. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.
3. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин ; под ред. А. М. Рембовского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2010. – 624 с.
4. Ципоренко В. В. Безпошуковий цифровий метод спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з подвійним кореляційним обробленням / В. В. Ципоренко // Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник «Радіотехніка». – № 167. – 2011. – С. 73-77.
5. Дзвонковская А. Л. Эффективность измерения углов прихода сигнала радиопеленгаторами на основе метода максимального правдоподобия / А. Л. Дзвонковская, А. Н. Дмитренко, А. В. Кузьмин // Радиотехника и электроника. – 2001. – № 10. – С. 1242-1247.
6. Ципоренко В. В. Дослідження безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з подвійним кореляційним обро-

бленням / В. В. Ципоренко // Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник «Радіотехніка». – № 170. – 2012. – С. 172-179.

7. Караваев В. В. Статистическая теория пассивной локации / В. В. Караваев, В. В. Сазонов. – М. : Радио и связь, 1987. – 240 с. – (Вып. 27, Статистическая теория связи).

8. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества / Л. С. Гуткин. – М. : Сов. радио, 1975.

9. Фалькович С. Е. Статистическая теория измерительных систем / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – М. : Радио и связь, 1981. – 288 с.

10. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический поход / Э. С. Айфичер, Д. У. Барри : пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс». – 2004. – 992 с.

11. Гончаров В. А. Методы оптимизации / В. А. Гончаров. – М. : Высшее образование, 2009. – 191 с.

References

1. Introduction into Theory of Direction Finding, [Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation](#), Catalog 2011/2012, pp. 72-95.

2. Slobodyanyuk P. V. eds., Blagodarnii V. G. and Stupak V. S. (2008) Dovidnik z radiomonitoringu [Reference of radio monitoring]. Nizhin, Aspekt-Poligraf, 588 p.

3. Rembovskii A. M. eds., Ashikhmin A. V., Koz'min V. A. (2010) Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva [Radio monitoring - objectives, methods, tools]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 624 p.

4. Tsyoprenko V. V. (2011) Bezposhukovyi tsyfrovyy metod spektralnoho korelyatsiino-interferometrychnoho radiopelenhuvannia z podviynym korelyatsiynym obroblenniam. Radiotekhnika KhNURE, No 167, pp. 73-77.

5. Dzvонkovskaya A. L., Dmitrenko A. N. and Kuz'min A. V. (2001) Effektivnost' izmereniya uglov prikhoda signala radiopelengatorami na osnove metoda maksimal'nogo pravdopodobiya [Measuring the effectiveness of angles of arrival of the signal direction finder based on the maximum likelihood method]. Radiotekhnika i elektronika, No 10, pp. 1242-1247.

6. Tsyoprenko V. V. (2012) Doslidzienna bezposhukovogo tsyfrovogo metodu spektralnoho korelyatsiyno-interferometrychnoho radiopelenguvannya z podviynym korelyatsiynym obroblenniam. Radiotekhnika KhNURE, No 170, pp. 172-179. (in Ukrainian)

7. Karavaev V. V. and Sazonov V. V. (1987) Statisticheskaya teoriya passivnoi lokatsii [Statistical theory of passive location]. Moscow, Radio i svyaz', 240 p.

8. Gutkin L. S. (1975) Optimizatsiya radioelektronnykh ustroystv po sovokupnosti pokazatelei kachestva [Optimize electronic devices on set of quality indicators]. Moscow, Sov. Radio.

9. Fal'kovich S. E. and Khomyakov E. N. (1981) Statisticheskaya teoriya izmeritel'nykh sistem [Statistical theory of measuring systems]. Moscow, Radio i svyaz', 288 p.

10. Ifeachor E. C. and Barrie W. J. (2002) Digital signal processing: a practical approach. Pearson Education.

11. Goncharov V. A. (2009) Metody optimizatsii [Methods of optimization]. Moscow, Vysshee obrazovanie, 191 p.

Ципоренко В. В., Ципоренко В. Г. Дослідження безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з подвійним кореляційно-згортковим обробленням. В результаті проведених досліджень визначено, що основним параметром рівняння дисперсії похибки оцінки напрямку на джерело радіовипромінювання для досліджуваного радіопеленгатора, який доцільно оптимізувати, є величина частотного перетворювального зсуву. Проведено параметричну оптимізацію безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з

подвійним кореляційно-згортковим обробленням за точністю. В результаті моделювання для згорткової моделі частотного зсуву отримано залежність середнього квадратичного відхилення оцінки пеленгу від відношення сигнал/шум для різних можливих значень частотного перетворювального зсуву. Аналітичні розрахунки та результати моделювання повністю співпали, що підтверджує правильність проведених досліджень та достовірність результатів оптимізації.

Ключові слова: оптимізація; безошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування; подвійне кореляційно-згорткове оброблення.

Ципоренко В. В., Ципоренко В. Г. **Исследование беспойскового цифрового корреляционно-интерферометрического радиопеленгатора с двукратной корреляционно-свёрточной обработкой.** В результате проведенных исследований определено, что основным параметром уравнения дисперсии погрешности оценки направления на источник радиоизлучения для исследуемого радиопеленгатора, который целесообразно оптимизировать, является величина частотного преобразующего сдвига. Проведена параметрическая оптимизация беспойскового цифрового корреляционно-интерферометрического радиопеленгатора с двукратной корреляционно-свёрточной обработкой по точности. В результате моделирования для свёрточной модели частотного сдвига получена зависимость среднего квадратичного отклонения оценки пеленга от отношения сигнал/шум для разных возможных значений циклического частотного преобразующего сдвига. Аналитические расчеты и результаты моделирования полностью совпали, что подтверждает правильность проведенных исследований и достоверность результатов оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация; беспойсковый цифровой метод корреляционно-интерферометрического пеленгования; двукратная корреляционно-свёрточная обработка.

Tsymporenko V. V., Tsymporenko V. G. **Research of Direct Digital Correlative-Interferometric Radio Direction Finder with Double Correlation-convolutional Processing**

Introduction. In this article the unsettled part of the general problem of the research of direct digital methods of correlative-interferometric direction-finding was solved. The purpose of the article is to optimize the direction-finding of the direct digital correlative-interferometric radio direction finder with double correlation-convolutional processing by its exactness.

Fundamentals of researches. As a result of the conducted researches it was defined that the basic parameter of equalization of dispersion of error of estimation of direction on the source of radio radiation for the explored radio direction finder, which ought to be optimized, is the size of frequency converting change.

Optimization. It was conducted the parametrical optimization of the direct digital correlative-interferometric radio direction finder with double correlation-convolutional processing by its exactness. As a result of the modelling the dependence of middle quadratic deflection of estimation of direction from the relation of signal/noise for the different possible values of circular frequency converting shift was obtained.

Conclusions. The analytical calculations and the results of the modelling fully coincided, that confirmed the rightness of the researches and the authenticity of the results of optimization.

Keywords: optimization; direct digital method of correlative-interferometric direction-finding; double correlation-convolutional processing.