

**ОПТИМІЗАЦІЯ БЕЗПОШУКОВОГО ЦИФРОВОГО  
КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО  
РАДІОПЕЛЕНГАТОРА З ПОДВІЙНИМ КОРЕЛЯЦІЙНИМ  
ОБРОБЛЕННЯМ ЗА ТОЧНІСТЮ ПЕЛЕНГУВАННЯ<sup>1</sup>**

*Ципоренко В. В., к.т.н., доцент*

*Житомирський державний технологічний університет,*

*м. Житомир, Україна,*

[tsiporenko.1985@mail.ru](mailto:tsiporenko.1985@mail.ru)

**OPTIMIZATION OF EXACTNESS OF DIRECT DIGITAL CORRELATION-  
INTERFEROMETER DIRECTION-FINDER WITH DOUBLE CORRELATION  
PROCESSING**

*Tsyurenko V. V., PhD, Associate Professor,*

*Zhytomyr State Technological University, Ukraine*

**Вступ**

Сучасні умови проведення радіомоніторингу характеризуються наявністю складної електромагнітної обстановки (ЕМО), що динамічно змінюється. Перспективним напрямком реалізації радіопеленгування в таких умовах є використання цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, у тому числі безпошукових. Вони забезпечують широкий робочий частотний діапазон, стійкість до завад, високу чутливість та точність [1–3].

Ефективність засобів пеленгування суттєво залежить від співвідношення їх параметрів, в першу чергу, швидкодії, точності, завадостійкості та апаратних витрат (вартості). Тому дослідження та оптимізація цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів за швидкістю та точністю є актуальною науковою задачею. Найчастіше для удосконалення пеленгаторів застосовують параметричну оптимізацію. Її перевагою є можливість забезпечення значного підвищення ефективності пеленгаторів за допомогою покращення одного основного параметру пеленгатора, наприклад, точності без суттєвого збільшення апаратних витрат. Це здійснюється за рахунок удосконалення тільки режимів прийому та оброблення, співвідношення параметрів складових модулів та їх кількості.

У роботі [4] запропоновано безпошуковий цифровий метод спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з подвійним кореляційним обробленням. Він забезпечує можливість оцінки пеленгу за

---

<sup>1</sup> <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1162>

допомогою одноканального корелятора з мінімальними апаратними витратами, але за час одного циклу кореляційного аналізу, тобто з максимальною швидкістю. Даний метод також 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, 12–14] наведені результати досліджень оптимізації алгоритмів оброблення радіовипромінювань та параметрів основних блоків цифрових кореляційних пеленгаторів, що використовують антенні решітки (АР) різної конфігурації. Показана висока ефективність їх застосування в умовах складної ЕМО та моніторингу шумоподібних радіовипромінювань.

У роботах [6, 7, 10, 11] досліджено ефективність та проведено оптимізацію основних алгоритмів оцінки напрямку на джерело радіовипромінювання (ДРВ) з використанням АР, визначені оптимальні оцінки просторових параметрів радіовипромінювань.

Однак в даних роботах не досліджені питання оптимізації безпошукових кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів з використанням подвійного кореляційного оброблення. Тому отримані результати не можуть бути безпосередньо використані для вирішення даної задачі.

Таким чином, невирішеною раніше частиною загальної проблеми дослідження безпошукових цифрових методів кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування є параметрична оптимізація безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з подвійним кореляційним обробленням.

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

### **Обґрунтування задачі оптимізації**

Виконаємо параметричну оптимізацію безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з подвійним кореляційним обробленням за точністю пеленгування [4].

Нехай в горизонтальній площині з випадкового невідомого напрямку  $\theta$  приймається неперервне випадкове стаціонарне гаусове радіовипромінювання  $S(t)$  точкового ДРВ з рівномірним енергетичним спектром  $S^2(\omega)$  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  $N$  потужності, постійною в межах смуги  $\Delta f_k$  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:

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

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;

$\tau_S$  – апріорі 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:

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

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

$\Delta\omega_{3C}$  – частотний перетворювальний зсув;

$c$  – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі;

$$\Delta\xi = \arctg \left[ \frac{\sum_{k=k_H}^{k_B} U_1(\omega_{ПЧ.k}) \cdot U_2(\omega_{ПЧ.k}) \cdot U_1(\omega_{ПЧ.k} + \Delta\omega_{3C}) \cdot U_2(\omega_{ПЧ.k} + \Delta\omega_{3C}) \cdot \sin[\Delta\phi_{\Delta.k}]}{\sum_{k=k_H}^{k_B} U_1(\omega_{ПЧ.k}) \cdot U_2(\omega_{ПЧ.k}) \cdot U_1(\omega_{ПЧ.k} + \Delta\omega_{3C}) \cdot U_2(\omega_{ПЧ.k} + \Delta\omega_{3C}) \cdot \cos[\Delta\phi_{\Delta.k}]} \right] + v \cdot \pi$$

– еквівалентний фазовий 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;

$U_1(\omega_{ПЧ.k}), U_2(\omega_{ПЧ.k})$  – амплітудні спектри сумішей  $U_1(t)$  та  $U_2(t)$  першого та другого радіоканалів пеленгатора відповідно, 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  $S_2(t)$ ;

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

Аналіз рівняння (2) показує, що похибка пеленгування визначається

співвідношенням похибки оцінки  $\hat{\tau}_3$  та величини антенної бази  $d$ . Як основний показник точності пеленгування доцільно використовувати дисперсію  $\sigma_\theta^2$  похибки оцінки напрямку на ДРВ [2, 3, 7], яка визначається для досліджуваного методу пеленгування згідно з рівнянням [6, 7]:

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

де  $q_{\text{ex}}$  – 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 оптимальності пеленгатора має вигляд:

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

Для реалізації оптимізації радіопеленгатора, що розглядається, визначимо вид цільової функції та функцій зв'язку [8]. Для цього проведемо аналіз особливостей критеріальної функції (3) з метою подальшого визначення цільової функції задачі оптимізації.

Аналіз рівняння (3) показує, що дисперсія  $\sigma_\theta^2$  похибки пеленгування суттєво залежить від способу реалізації процедури подвійного кореляційного аналізу спектрів  $U_1(j\omega_{\text{ПЧ.к}})$  і  $U_2(j\omega_{\text{ПЧ.к}})$  реалізацій прийнятого випромінювання в межах смуги  $\Delta f_k$  пропускання радіоканалів пеленгатора. При цьому регулювання таких параметрів пеленгатора, як величина  $d$  антенної бази, чутливість  $q_{\text{ex}}$  і тривалість  $T_a$  процесу аналізу радіовипромінювання, мають суттєві обмеження при оптимізації. Це зумовлюється можливостями сучасних технологій, вимогами до габаритів, швидкодії, а також ціни пеленгатора [3, 15]. Можливості оптимізації такого параметра, як коефіцієнт  $K_w$  шуму вагової функції «вікна», що визначає особливості цифрового спектрального аналізу, також суттєво обмежені вимогами до завадостійкості пеленгування [3, 12, 16].

Необхідно врахувати, що параметри випромінювання ДРВ, яке пеленгується, такі, як середня або несуча частота  $\omega_0$  часового енергетичного спектра та напрямок  $\theta$  приходу радіовипромінювання, на алгоритм пеленгування не впливають і мають тільки глобальне обмеження по діапазону робочих частот та ширині просторового сектора пеленгування. Суттєво впливає на точність та швидкодію пеленгування тривалість  $T_a$  процесу аналізу радіовипромінювань, що приймаються одночасно в межах смуги  $\Delta f_k$  пропускання радіоканалів. Однак на реалізацію процедури подвійного

кореляційного аналізу та алгоритму в цілому тривалість  $T_a$  процесу аналізу радіовипромінювань також не впливає.

Таким чином, аналіз рівняння (3) показує, що суттєвий вплив на дисперсію  $\sigma_\theta^2$  похибки пеленгування з можливостями широкого регулювання мають такі чинники, як величина  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву і ширина смуги  $\Delta\omega_a$  аналізу при подвійному кореляційному обробленні. У свою чергу, ширина смуги  $\Delta\omega_a$  аналізу залежить від величини  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву. Тому цільову функцію  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  для подальшої оптимізації досліджуваного методу пеленгування з урахуванням рівняння (3) доцільно визначити як функцію змінних  $\Delta\omega_{3C}$  та  $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})$  наступним чином:

$$F_1(\Delta\omega_{3C}) = f(\Delta\omega_{3C}, \Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})) = \Delta\omega_{3C}^2 \cdot \Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C}). \quad (5)$$

Виконаємо якісну оцінку особливостей цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$ . З урахуванням рівняння (3) для забезпечення умови оптимізації (4) значення цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  повинно мати екстремум типу  $\max$ :

$$\max_{\Delta\omega_{3C}} F_1(\Delta\omega_{3C}) = \max_{\Delta\omega_{3C}} [\Delta\omega_{3C}^2 \Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})]. \quad (6)$$

Цільова функція  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  пропорційна квадрату величини  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву і по відношенню до нього є парною функцією. Тому з урахуванням обмеженості ширини  $\Delta\omega_S$  спектра реалізацій випромінювання ДРВ, що пеленгується, величиною смуги  $2\pi \cdot \Delta f_k \geq \Delta\omega_S$  пропускання радіоканалів пеленгатора, визначимо діапазон області визначення цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  наступним чином:

$$-\Delta\omega_S < \Delta\omega_{3C} < \Delta\omega_S. \quad (7)$$

Для подальшої оцінки величини смуги  $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})$  аналізу доцільно виконати аналіз вибіркової моделі її формування при подвійному кореляційному аналізі.

Вибіркова модель формування смуги  $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{3C})$  передбачає, що спектри  $U_1(j\omega_{ПЧ.к})$  і  $U_2(j\omega_{ПЧ.к})$  реалізацій випромінювання ДРВ, що пеленгується, і їх перший добуток  $U_{D1}(j\omega_{ПЧ.к})$  є неперіодичними функціями частоти і мають область визначення в межах смуги  $[\omega_{ПЧ.Н}; \omega_{ПЧ.В}]$  частот розподілу спектральної густини випромінювання  $S(t)$ :

$$U_{D1}(j\omega_{ПЧ.к}) = U_1^*(j\omega_{ПЧ.к}) \cdot U_2(j\omega_{ПЧ.к}), \quad (8)$$

$$\text{де } U_{D1}(j\omega_{ПЧ.к}) = \begin{cases} U_{D1}(j\omega_{ПЧ.к}), & \text{при } (\omega_{ПЧ.Н} \leq \omega_{ПЧ.к} \leq \omega_{ПЧ.В}) \\ 0, & \text{при } (\omega_{ПЧ.Н} > \omega_{ПЧ.к} > \omega_{ПЧ.В}) \end{cases}.$$

Згідно досліджуваного методу пеленгування [4] додатково формується

другий добуток  $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$  спектрів шляхом перемноження комплексно спряженого першого добутку  $U_{D1}^*(j\omega_{ПЧ.k})$  спектрів та його реалізації  $U_{D1}(j(\omega_{ПЧ.k} + \Delta\omega_{ЗС}))$ , що зсунута за частотою на величину  $\Delta\omega_{ЗС}$ :

$$U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k}) = U_{D1}^*(j\omega_{ПЧ.k}) \cdot U_{D1}(j(\omega_{ПЧ.k} \pm \Delta\omega_{ЗС})). \quad (9)$$

В результаті ненульові відліки другого добутку  $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$  спектрів будуть формуватись в межах смуги  $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{ЗС})$  аналізу, величина якої визначається наступним чином:

$$\Delta\omega_a(\Delta\omega_{ЗС}) = \Delta\omega_S - |\Delta\omega_{ЗС}|, \quad (10)$$

де  $\Delta\omega_S = \omega_{ПЧ.В} - \omega_{ПЧ.Н}$  – ширина спектра реалізації випромінювання ДРВ.

Епюри формування другого добутку  $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$  спектрів та величини смуги  $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{ЗС})$  аналізу за умови додатного значення  $\Delta\omega_{ЗС}$  для вибіркової моделі наведені на рис. 1.

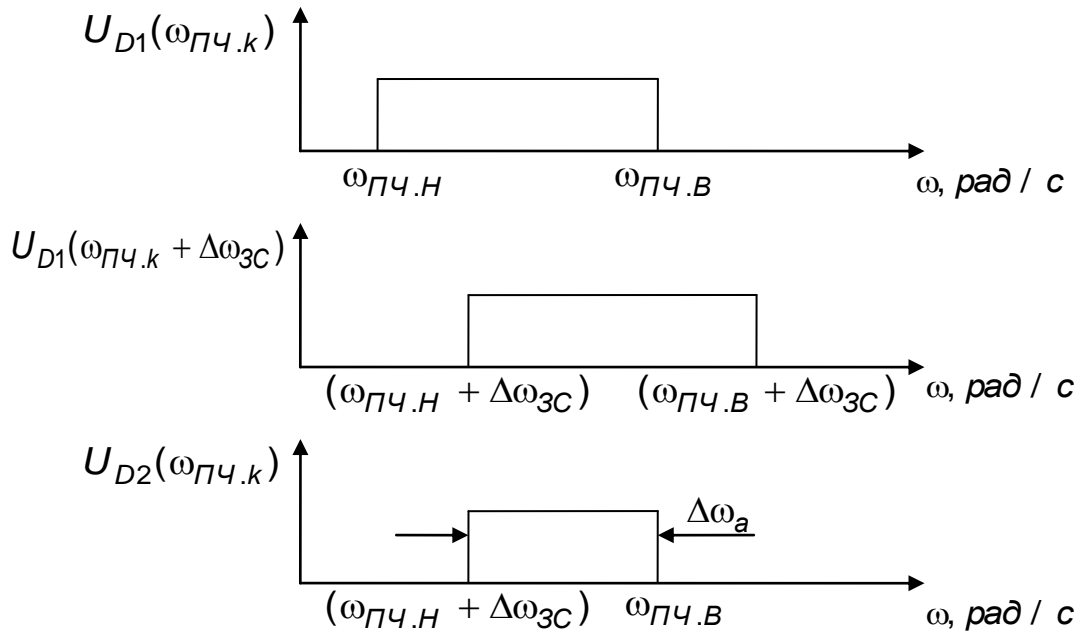


Рис. 1. Епюри формування другого добутку  $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.k})$  спектрів та смуги  $\Delta\omega_a$  аналізу для вибіркової моделі

Аналіз рівняння (10) та епюр на рис. 1 показує, що при збільшенні за модулем величини зсуву  $\Delta\omega_{ЗС}$  величина смуги  $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{ЗС})$  аналізу відповідно зменшується. З урахуванням рівнянь (6)–(10) цільова функція  $F_1(\Delta\omega_{ЗС})$  для вибіркової моделі буде мати наступний вигляд:

$$F_1(\Delta\omega_{ЗС}) = \Delta\omega_{ЗС}^2 \cdot (\Delta\omega_S - |\Delta\omega_{ЗС}|). \quad (11)$$

Таким чином, аналіз рівнянь (10) та (11) показує, що частотний перетворювальний зсув  $\Delta\omega_{ЗС}$  і смуга  $\Delta\omega_a(\Delta\omega_{ЗС})$  аналізу є антагоністичними чинниками, що впливають на значення цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{ЗС})$  з різни-

ми степенями.

### Вирішення задачі оптимізації

З урахуванням рівнянь (6) і (11) визначимо рівняння оптимізації (вид цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  і критерій оптимальності) для вибіркової моделі наступним чином:

$$\max_{\Delta\omega_{3C}} F_1(\Delta\omega_{3C}) = \max_{\Delta\omega_{3C}} \left[ (\Delta\omega_S - |\Delta\omega_{3C}|) \cdot \Delta\omega_{3C}^2 \right]. \quad (12)$$

Розв'язкою рівняння (12) є оптимальні значення  $\Delta\omega_{3C.opt1}$  перетворювального частотного зсуву, тобто:

$$\Delta\omega_{3C.opt1} = \arg \max \{F_1(\Delta\omega_{3C})\}. \quad (13)$$

Для подальшої оптимізації і визначення розв'язку рівняння (13) визначимо кількість  $L$  і значення  $f_l(X)$  функцій зв'язку, а також вид шуканих екстремумів цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$ .

По-перше, оцінка  $\hat{\theta}$  напрямку на ДРВ має здійснюватись за один цикл кореляційного оброблення та з використанням одного двоканального корелятора. З урахуванням цього перша  $f_1(N_C)$  і друга  $f_2(N_k)$  функції зв'язку мають вигляд:

$$\begin{aligned} f_1(N_C) &= N_C = 1; \\ f_2(N_k) &= N_k = 1, \end{aligned} \quad (14)$$

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

По-друге, ширина спектра  $\Delta\omega_S$  випромінювання ДРВ, що пеленгується, є обмеженою смугою  $\Delta f_k$  пропускання пеленгаційних каналів, тобто  $\Delta\omega_S \leq 2\pi \cdot \Delta f_k$ . З урахуванням цього діапазон можливих однозначних значень  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву не перевищує за модулем величини  $\Delta\omega_S$ , а область визначення цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  становить смугу частот  $\{\omega_{ПЧ.Н} - \Delta\omega_S; \omega_{ПЧ.В} + \Delta\omega_S\}$ . З урахуванням цього третя  $f_3(\Delta\omega_{3C})$  і четверта  $f_4(\Delta\omega_{3C})$  функції зв'язку приймають вигляд:

$$\begin{aligned} f_3(\Delta\omega_{3C}) &= -\Delta\omega_S < \Delta\omega_{3C} < \Delta\omega_S; \\ f_4(\Delta\omega_{3C}) &= \omega_{ПЧ.Н} - \Delta\omega_S \leq \omega_{ПЧ.к} \leq \omega_{ПЧ.В} + \Delta\omega_S. \end{aligned} \quad (15)$$

По-третє, прийом випромінювання  $S(t)$  ДРВ, що пеленгується, здійснюється за обмежений час аналізу  $T_a < \infty$ , а комплексні спектри його реалізацій в кожному пеленгаційному каналі визначаються на основі алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Тому мінімальне значення  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву буде не менше величини основної гармоніки  $(2\pi / T_a)$  відповідного ряду Фур'є, а поточні значення – кратні цій величині [15, 16]. З урахуванням цього, рівняння п'ятої  $f_5(\Delta\omega_{3C})$  і шостої

$f_6(\Delta\omega_{3C})$  функцій зв'язку будуть наступними:

$$\begin{aligned} f_5(\Delta\omega_{3C}) &= \min|\Delta\omega_{3C}| = 2\pi / T_a; \\ f_6(\Delta\omega_{3C}) &= |\Delta\omega_{3C}| = k \cdot 2\pi / T_a. \end{aligned} \quad (16)$$

де  $k = 1, 2, \dots$  – цілі додатні числа.

В четверте, можливі значення  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву не мають особливостей, а цільова функція не має точок розриву. Тому оптимальне значення  $\Delta\omega_{3C.opt1}$  повинно відповідати глобальному екстремуму цільової функції.

З урахуванням рівнянь (14)–(16) можливо зробити висновок, що оптимізація повинна здійснюватись з урахуванням шести  $L = 6$  функцій зв'язку і пошуком глобального умовного екстремуму.

Враховуючи визначені початкові умови, поставлену задачу оптимізації доцільно вирішити з використанням скалярного методу та похідних цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  [8, 9, 17]. Для цього оптимальне значення  $\Delta\omega_{3C.opt1}$  частотного перетворювального зсуву визначимо як розв'язок диференційного рівняння:

$$\frac{dF_1(\Delta\omega_{3C})}{d\Delta\omega_{3C}} = 0. \quad (17)$$

З урахуванням рівняння (12) рівняння (17) матиме вигляд:

$$\frac{dF_1(\Delta\omega_{3C})}{d\Delta\omega_{3C}} = 2 \cdot \Delta\omega_S \cdot \Delta\omega_{3C} - 3 \cdot \Delta\omega_{3C}^2 = 0. \quad (18)$$

Коренем рівняння (18), що задовольняє умовам задачі оптимізації, є наступне значення  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву:

$$|\Delta\omega_{3C.opt1}| = 2 \cdot \Delta\omega_S / 3. \quad (19)$$

Визначимо тип екстремуму цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  шляхом оцінки знаку її другої похідної в точці екстремуму [17]:

$$\frac{d^2F_1(\Delta\omega_{3C})}{d\Delta\omega_{3C}^2} = 2 \cdot \Delta\omega_S - 6 \cdot \Delta\omega_{3C} \Big|_{\Delta\omega_{3C}=2\Delta\omega_S/3} < 0. \quad (20)$$

Аналіз співвідношень (19) та (20) показує, що отриманий розв'язок рівняння оптимізації відповідає глобальному умовному екстремуму цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  типу  $\max$  і усім обмеженням функцій зв'язку. Таким чином, поставлена задача оптимізації вирішена.

Для оцінки достовірності отриманих результатів оптимізації виконаємо аналіз поведінки цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{3C})$ , визначеної рівнянням (12), з використанням програмного пакету MathCad. Результати моделювання наведені на рис. 2. На рис. 2 позначено  $F_1(\Delta\omega_{3C})$  як  $F_1(\Delta\omega)$ , а  $\Delta\omega_{3C}$  як  $\Delta\omega$ .



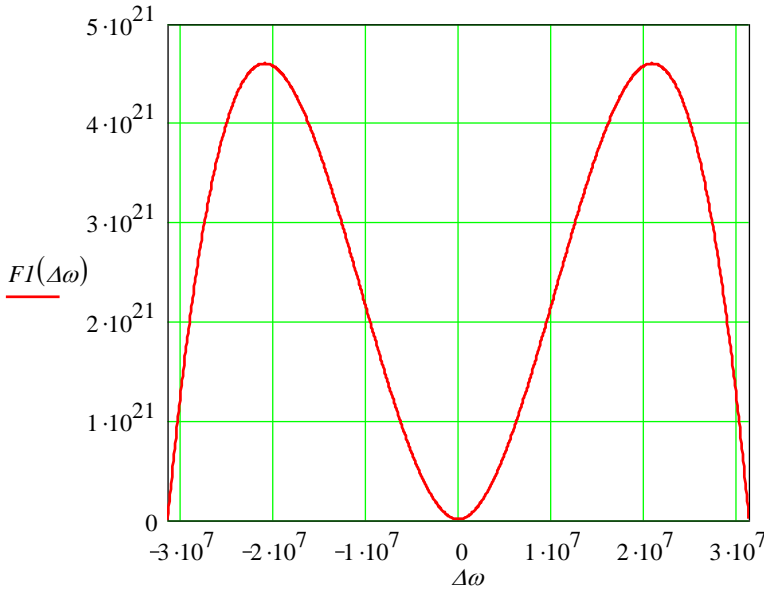


Рис. 2. Залежність функції  $F_1(\Delta\omega_{ЗС})$  від  $\Delta\omega_{ЗС}$  при  $\Delta\omega_S = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \text{ рад / с}$

Аналіз залежності на рис. 2 показує, що цільова функція  $F_1(\Delta\omega_{ЗС})$  є кусочно-монотонною симетричною функцією, яка має два екстремуми для значень зсуву  $\Delta\omega_{ЗС,1,2} = \pm 2\Delta\omega_S / 3 = \pm 2,094 \cdot 10^7$ , величина яких узгоджуються з результатом аналітичної оптимізації (19).

Аналіз отриманих результатів оптимізації вибіркової кореляцій-

ної моделі показав, що дисперсія похибки  $\sigma_\theta^2$  пеленгування і, відповідно, цільова функція  $F_1(\Delta\omega_{ЗС})$  суттєво залежать від значення  $\Delta\omega_{ЗС}$  частотного перетворювального зсуву і мають немонотонний характер. Максимальне значення цільової функції  $F_1(\Delta\omega_{ЗС})$  і, відповідно, мінімальне значення похибки пеленгування  $\sigma_\theta^2$  забезпечуються при значенні  $\Delta\omega_{ЗС}$  частотного перетворювального зсуву, що перевищує половину ширини  $\Delta\omega_S$  спектра радіовипромінювання  $S(t)$ , що пеленгується. Це зумовлює наявність певних енергетичних втрат за рахунок того, що зменшується ширина смуги частот радіовипромінювання  $S(t)$ , яка використовується при здійсненні подвійного кореляційного аналізу.

Наприклад, при використанні зсуву  $\Delta\omega_{ЗС} = 2\Delta\omega_S / 3$  використовується смуга частот  $[\omega_{ПЧ.Н} + \Delta\omega_S / 3; \omega_{ПЧ.В} - \Delta\omega_S / 3]$  першого добутку  $U_{D1}(j\omega_{ПЧ.к})$  спектрів, а ширина смуги частот другого добутку  $U_{D2}(j\omega_{ПЧ.к})$  спектрів буде дорівнювати  $\Delta\omega_S / 3$ . Оптимальність використання смуги частот  $[\omega_{ПЧ.Н} + \Delta\omega_S / 3; \omega_{ПЧ.В} - \Delta\omega_S / 3]$  першого добутку  $U_{D1}(j\omega_{ПЧ.к})$  спектрів зумовлюється тим, що інформативність спектральних відліків першого добутку  $U_{D1}(j\omega_{ПЧ.к})$  спектрів неоднакова, має максимальне значення для частот  $\omega_{ПЧ.Н}$  та  $\omega_{ПЧ.В}$  і зменшується при наближенні до середньої частоти  $(\omega_{ПЧ.Н} + \omega_{ПЧ.В}) / 2$ . Також аналіз рис. 2 показує, що цільова функція  $F_1(\Delta\omega_{ЗС})$  є несиметричною відносно значення

аргументу  $\Delta\omega_{3C,1,2}$ , які відповідають глобальним екстремумам.

### Результати моделювання

Проведено програмне моделювання роботи пеленгатора відповідно (2) та дослідження його точності за допомогою розробленої програмної моделі 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  $d = 50\text{м}$ ; кількість дослідів для оцінки одного відліку  $\sigma_\theta^2 = 50$ .

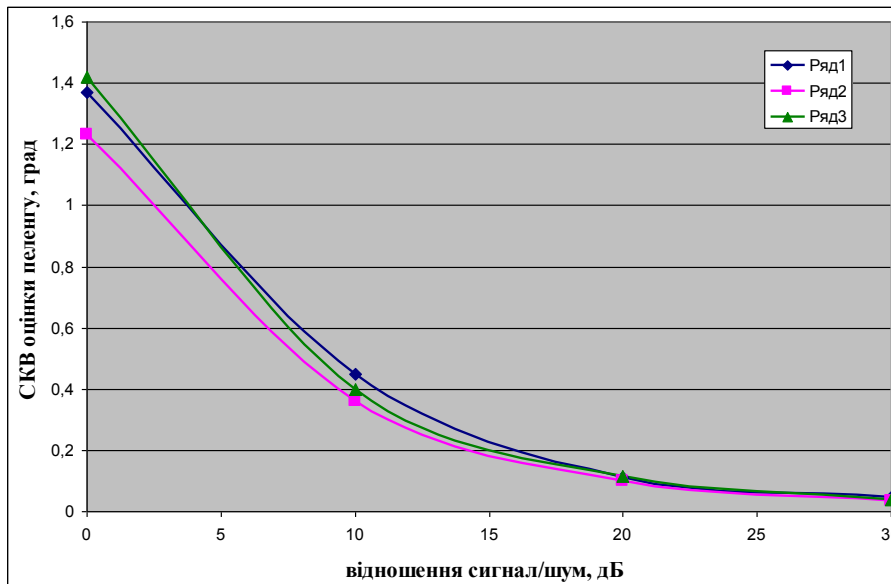


Рис. 3. Сімейство залежностей СКВ  $\sigma_\theta$  оцінки пеленгу від відношення сигнал/шум при різних значеннях  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву

вального зсуву і для вибіркової моделі його формування.

На рис. 3 наведено результати моделювання для вибіркової моделі, ряд 1 – для зсуву  $\Delta\omega_{3C} = 0,5 \cdot \Delta\omega_S$ ; ряд 2 – для зсуву  $\Delta\omega_{3C} = 2 \cdot \Delta\omega_S / 3$ ; ряд 3 – для зсуву  $\Delta\omega_{3C} = 4 \cdot \Delta\omega_S / 5$ .

Аналіз результатів моделювання на рис. 3 показує, що похибка  $\sigma_\theta^2$  пеленгування при використанні алгоритму з подвійним кореляційним обробленням суттєво залежить від значення  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву. При цьому мінімальне значення СКВ оцінки пеленгу забезпечу-

В результаті моделювання отримано сімейство залежностей середньоквадратичного відхилення (СКВ) похибки оцінки пеленгу від відношення  $\rho_{сх}$  сигнал/шум на вході пеленгаційних радіоканалів при різних значеннях  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворю-

ється при виборі зсуву  $\Delta\omega_{3C} = 2 \cdot \Delta\omega_S / 3$ . При використанні інших значень  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву, наприклад, меншого  $\Delta\omega_{3C} = 0,5 \cdot \Delta\omega_S$  або більшого  $\Delta\omega_{3C} = 4 \cdot \Delta\omega_S / 5$ , похибка пеленгування суттєво збільшується, що узгоджується з результатами аналітичної оптимізації. Також абсолютні значення СКВ оцінки пеленгу суттєво залежать від відношення  $q_{ex}$  сигнал/шум на вході пеленгаційних каналів АР і за квадратично-гіперболічною залежністю зменшуються при зменшенні рівня  $N$  власних шумів пеленгатора чи збільшенні потужності випромінювання  $S(t)$ , що пеленгується. При цьому для оптимального значення  $\Delta\omega_{3C.opt1}$  частотного перетворювального зсуву при відношенні сигнал/шум  $q_{ex} \in [0; 30]$  дБ СКВ оцінки пеленгу для заданих початкових умов моделювання становить  $\sigma_\theta \in [1, 23; 0, 034]^\circ$  відповідно.

Результати оптимізації і моделювання показали, що досліджуваний безпошуковий цифровий кореляційно-інтерферометричного пеленгатор з подвійним кореляційним обробленням при застосуванні вибіркової моделі формування частотного перетворювального зсуву забезпечує найбільшу точність безпошукової оцінки напрямку на ДРВ з широкосмуговим випромінюванням при виборі зсуву  $\Delta\omega_{3C.opt1} = 2 \cdot \Delta\omega_S / 3$ .

### **Висновки**

В результаті проведеної параметричної оптимізації безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з подвійним кореляційним обробленням за точністю пеленгування виконано аналіз залежності СКВ оцінки пеленгу від значення  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву для вибіркової моделі його формування. Показано, що похибка  $\sigma_\theta^2$  пеленгування суттєво залежить від значення  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву і ця залежність має немонотонний характер. Виконано параметричну оптимізацію пеленгатора за величиною  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву та показано, що похибка  $\sigma_\theta^2$  пеленгування має два глобальних мінімуми при  $\Delta\omega_{3C.opt1,2} = \pm 2 \cdot \Delta\omega_S / 3$ .

Проведено програмне моделювання роботи досліджуваного радіопеленгатора та оцінена його точність. Результати моделювання повністю 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  $|\Delta\omega_{3C.opt1}| = 2 \cdot \Delta\omega_S / 3$  частотного перетворювального зсуву та вибіркової моделі досліджуваний метод пеленгування забезпечує можливість безпошукової оцінки напрямку на ДРВ з широкосмуговими випромінюваннями

з СКВ оцінки пеленгу  $\sigma_{\theta}^2 \in [1, 23; 0, 034]^\circ$  при відношенні сигнал/шум  $q_{\text{вх}} \in [0; 30]$  дБ відповідно. При використанні інших значень  $\Delta\omega_{3C}$  частотного перетворювального зсуву, наприклад, меншого  $\Delta\omega_{3C} = 0,5 \cdot \Delta\omega_S$  або більшого  $\Delta\omega_{3C} = 4 \cdot \Delta\omega_S / 5$ , похибка пеленгування суттєво збільшується, що узгоджується з результатами параметричної оптимізації.

В подальшому доцільно виконати оптимізацію досліджуваного радіопеленгатора для інших моделей частотного перетворювального зсуву.

#### **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 обробленням / 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. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.
10. Фалькович С. Е. Статистическая теория измерительных систем / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – М. : Радио и связь, 1981. – 288 с.
11. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю. Г. Сосулин. – Радио и связь, 1992. – 304 с.
12. Виноградов А. Д. Оптимизация структур малоэлементных кольцевых антенных решёток интерферометрических радиопеленгаторов / А. Д. Виноградов // Антенны. – 1999. – №1 (42). – С. 12-14.
13. Ваганов А. М. Итерационный алгоритм вычисления оценок максимального правдоподобия параметров узкополосных сигналов / А. М. Ваганов, И. Р. Уразгильдиев // Радиотехника. – 2001. – № 7. – С. 56-64.
14. Вертоградов Г. Г. Адаптивный алгоритм глобальной минимизации в корреляционном интерферометре с антенной решёткой произвольной пространственной конфи-

гурації / Г. Г. Вертоградов, Н. М. Чванов, В. Н. Шевченко // Радиоконтроль. – 1999. – № 1. – С. 22-26.

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

16. Harris F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform / F. J. Harris // [Proceedings of the IEEE](#). – 1978. – Vol. 66, [Issue 1](#). – P. 51-83.

17. 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. Tsyporenko 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. Tsyporenko V. V. (2012) Doslidzienna bezposhukovogo tsyfrovogo metodu spektralnogo 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. Tikhonov V. I. (1982) *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical radioengineering]. Moscow, Radio i svyaz', 624 p.

10. 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.

11. Sosulin Yu. G. (1992) *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii i radionavigatsii* [Theoretical basis of radar and navigation]. Radio i svyaz', 304 p.

12. Vinogradov A. D. (1999) Optimizatsiya struktur maloelementnykh kol'tsevykh anten nykh reshetok interferometrycheskikh radiopelengatorov [Optimization of structures of small element circular antenna arrays of interferometric finders]. *Antenny*, No 1(42), pp. 12-14.

13. Vaganov A. M. and Urazgil'diev I. R. (2001) Iteratsionnyi algoritm vychisleniya otsenok maksimal'nogo pravdopodobiya parametrov uzkopolosnykh signalov [An iterative algorithm for computing the maximum likelihood estimates of the parameters of broadband signals]. *Radioelektronika*. No 7, pp. 56-64.

14. Vertogradov G. G., Chvanov N. M. and Shevchenko V. N. (1999) Adaptivnyi algoritm global'noi minimizatsii v korrelyatsionnom interferometre s antennoi reshetkoi proizvol'noi prostranstvennoi konfiguratsii [Adaptive algorithm for global minimization in the

correlation interferometer with antenna array of arbitrary spatial configuration]. *Radiokontrol'*, No 1, pp. 22-26.

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

16. Harris F. J. (1978) On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE.*, Vol. 66, Iss. 1, pp. 51-83. doi : 10.1109/proc.1978.10837

17. Goncharov V. A. (2009) *Metody optimizatsii* [Methods of optimization]. Moskow, Vysshee obrazovanie, 191 p.

*Ципоренко В. В. Оптимізація безошукowego цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з подвійним кореляційним обробленням за точністю пеленгування. 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 безошукowego цифрового кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з подвійним кореляційним обробленням за точністю. В результаті моделювання для вибіркової 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; безошуковой цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування; подвійне кореляційне оброблення.

*Ципоренко В. В. Оптимизация безошукowego цифрового корреляционно-интерферометрического радиопеленгатора с двукратной корреляционной обработкой по точности пеленгования. 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 безошукowego цифрового корреляционно-интерферометрического радиопеленгатора с двукратной корреляционной обработкой по точности. В результате моделирования 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; безошуковой цифровой метод корреляционно-интерферометрического пеленгования; двукратная корреляционная обработка.

*Tsyropenko V. V. Optimization of Direct Digital Correlative-Interferometric Radio Direction Finder with Double Correlation Processing by Exactness of Direction-Finding*

Introduction. In this article the unsettled part of the general problem of the research of direct digital methods of correlative-interferometric radio 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 processing by its exactness.

Fundamentals of researches. As a result of the conducted researches it was defined that

*the basic equalization parameter of dispersion of direction estimation error on the source of radio radiation for the explored radio direction finder, which ought to be optimized, is the size of frequency converting shift.*

*Optimization. The parametrical optimization of the direct digital correlative-interferometric radio direction finder with double correlation processing by its exactness was conducted. As a result of the modelling the dependence of middle quadratic deflection of direction estimation 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 are 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 processing.*