

ОПТИМІЗАЦІЯ БЕЗПОШУКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДУ КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ З РЕКОНСТРУЮВАННЯМ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІТИЧНОГО СИГНАЛУ

Ципоренко В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Біомедичної інженерії та телекомунікацій, Житомирський державний технологічний університет, Житомир, Україна.

Ципоренко В. Г. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Біомедичної інженерії та телекомунікацій, Житомирський державний технологічний університет, Житомир, Україна.

Нікітчук Т. М. – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри Біомедичної інженерії та телекомунікацій, Житомирський державний технологічний університет, Житомир, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. На сьогодні в автоматизованих системах радіомоніторинга пеленгування радіоелектронних засобів здійснюється в умовах складної електромагнітної обстановки, великої апріорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах реального масштабу часу реалізації. Перспективним напрямком для вказаних умов є використання широкосмугових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів із застосуванням цифрового оброблення комплексних спектрів прийнятої суміші радіовипромінювань.

Мета. Метою статті є дослідження та оптимізація безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу.

Метод. В роботі виконано аналіз особливостей реалізації та точності дослідженого методу пеленгування, а також аналітична оптимізація безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу.

Результати. Визначено параметри, що входять до рівняння дисперсії похибки оцінки напрямку на джерело радіовипромінювання для безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу, що підлягають оптимізації. Показано, що основними параметрами, які доцільно оптимізувати, є величина рознесення між вибраними елементами антенної решітки, для просторових положень яких проводиться реконструювання комплексного аналітичного сигналу, та їх номери. Проведено теоретичну оптимізацію параметрів дослідженого методу, а також порівняно аналітичні розрахунки з результатами моделювання. В результаті моделювання отримано залежність методичної похибки оцінки пеленга та середньоквадратичної оцінки пеленга при дії нормального гаусівського шуму від значень оптимізованих параметрів.

Висновки. Проведено теоретичну оптимізацію параметрів дослідженого методу і визначено, що доцільним є використання симетричного рознесення на 28 кроків 64-елементної антенної решітки для мінімізації дисперсії похибки оцінки напрямку на джерело радіовипромінювання і забезпечення максимальної точності пеленгування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: оптимізація; безпошуковий цифровий метод; кореляційно-інтерферометричне пеленгування; реконструювання просторового аналітичного сигналу.

АБРЕВІАТУРИ

АР – антенна решітка;
ДРВ – джерело радіовипромінювання;
ДС – діаграма спрямованості;
ЕМО – електромагнітна обстановка;
СКВ – середнє квадратичне відхилення.

НОМЕНКЛАТУРА

\tilde{n} – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі;
 d – відстань між елементами (крок) лінійної АР;
 $F(z_1, z_2)$ – цільова функція, що оптимізується;
 K_{Wt} – коефіцієнт шумової смуги вагової функції вікна для часового спектрального аналізу;
 $K_{W\theta}$ – коефіцієнт шумової смуги вагової функції $W_\theta(z)$ цифрового просторового спектрального аналізу;

K_σ – коефіцієнт пропорційності, що не залежить від змінних z_1 та z_2 ;

$K(\tau, z_1, z_2)$ – оператор кореляційного оброблення;

m_S – кількість спектрально-просторових відліків сигнальної групи;

$n_z(t)$ – адитивний гаусів шум з рівномірним розподілом двосторонньої густини потужності в межах смуги одночасного аналізу z -го каналу;

N_C – кількість циклів кореляційної оцінки напрямку на ДРВ;

P_{aN} – потужність шумової складової $S_{aN}(jz)$ комплексного аналітичного сигналу;

$S(t)$ – прийнятий квазінеперервний випадковий стаціонарний сигнал;

$S_z(t - \tau_z)$ – корисний сигнал, що приймається z -м пеленгаційним каналом;

$S_a(jz)$ – комплексний аналітичний сигнал;

$S_{aS}(jz)$, $S_{aN}(jz)$, $S_{aS}(z)$, $S_{aN}(z)$ – сигнальна і адитивна шумові складові комплексного аналітичного сигналу та їх модулі відповідно;

t – змінна часу;

T_a – тривалість процесу аналізу радіовипромінювання;

$U_z(t)$ – суміш, що приймається z -м пеленгаційним каналом;

$W_\theta(z_1)$, $W_\theta(z_2)$ – значення вагової функції вікна у вибраних просторових точках z_1 , z_2 АР при просторовому спектральному аналізі і формуванні багатопелюсткової ДС;

z_1 , z_2 – номери вибраних антенних елементів АР, для яких виконують реконструювання комплексного аналітичного сигналу;

Z – кількість ідентичних пеленгаційних радіоканалів АР;

$z_C = Z/2$ – номер центрального елемента АР, що є середньою точкою апертури;

z_h – номер елемента АР, що є вибраною точкою симетрії;

$\omega_0 \in [\omega_H, \omega_B]$ – середня частота часового енергетичного спектра випромінювання ДРВ, що пеленгується;

ω_H, ω_B – нижня та верхня частоти смуги аналізу;

Δf_k – смуга частот аналізу пеленгаційного радіоканалу;

$\Delta z = (z_2 - z_1)$ – величина рознесення між вибраними елементами АР;

$\Delta z_{\text{кор}}$ – інтервал кореляції;

$\Delta \theta$ – методична похибка оцінки пеленга;

$\Delta \psi_a$ – різниця аргументів комплексного аналітичного сигналу $S_a(jz)$;

θ – напрямок на ДРВ;

$\mu_{\text{вх}}$ – вхідне відношення сигнал/шум після антенних елементів;

σ_θ^2 – дисперсія похибки оцінки напрямку на ДРВ;

σ_θ – СКВ оцінки напрямку на ДРВ;

τ_z – затримка корисного сигналу в z -му каналі відносно певного опорного каналу, що залежить від напрямку на ДРВ.

ВСТУП

Типовими умовами роботи засобів пеленгування у складі сучасних систем радіомоніторингу, радіонавігації та мобільного радіозв'язку є складна ЕМО, що динамічно змінюється. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для вказаних умов є використання цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів.

Основною перевагою цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точ-

ність пеленгування джерел шумоподібних радіовипромінювань. Це зумовлено можливістю використання ефективних алгоритмів оброблення сигналів в умовах априорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, ефективною компенсацією завад і спотворень, що зумовлені впливом сторонніх об'єктів і елементів АР. Також технологія кореляційно-інтерферометричного пеленгування дає можливість використання різних конфігурацій АР, що дозволяє збільшувати точність пеленгування, розширювати область однозначного пеленгування і збільшувати просторову роздільну здатність [1].

Зазвичай кореляційно-інтерферометричне пеленгування реалізується пошуковим компенсаційним методом. Недоліком цього методу є великі часові або апаратні витрати. Ефективність засобів пеленгування суттєво визначається співвідношенням їх точності, швидкодії, завадозахищеності та відповідних апаратних витрат. Тому розробка та оптимізація швидкодіючих цифрових методів та засобів кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування, що виконують пряму кореляційну оцінку напрямку на ДРВ, є актуальною науковою задачею.

Об'єктом дослідження є процес кореляційно-інтерферометричного пеленгування з використанням безпошукового алгоритму.

Предметом дослідження є безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу.

Метою дослідження є оптимізація безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай з невідомого напрямку θ приймається корисний сигнал $S(t)$ з рівномірним енергетичним спектром лінійною АР із Z ідентичних пеленгаційних радіоканалів, що мають нормальні власні шуми $n_z(t)$. Для вказаних умов в цифровій формі синтезують багатопелюсткову ДС, що перекриває сектор $(0-180)^\circ$, і виконують паралельний просторовий узгоджений прийом суміші $U_z(t)$ з подальшим реконструюванням відповідного комплексного аналітичного сигналу $S_a(jz)$ в межах апертури АР. Рівень бічних пелюсток синтезованих Z парціальних ДС визначається ваговою функцією $W_\theta(z)$ і забезпечує необхідну селекцію зовнішніх завад за напрямком до рівня, що менше рівня власних шумів $n_z(t)$ АР. Напрямок θ визначають шляхом кореляційного оброблення реалізації $S_a(jz)$: $\theta = \arg\{K(\tau, z_1, z_2)\}$, де $(z_1, z_2) \in \{0, \dots, (Z-1)\}$. Необхідно визначити оптимальне значення пари елементів АР, що забезпечує мінімум дисперсії σ_θ^2 оцінки напрямку на ДРВ: $(z_1, z_2)_{\text{opt}} \rightarrow \min \sigma_\theta^2$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Результати досліджень та оптимізації кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів представлені у великій кількості сучасних наукових праць.

У роботах [2, 3] виконано розробку та аналіз завадостійкості безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу. Отримано рівняння для дисперсії оцінки напрямку на ДРВ. Однак параметрична оптимізація цього методу з метою мінімізації дисперсії оцінки напрямку на ДРВ не виконувалась.

У роботах [4, 5] проведено розробку та дослідження пошукових кореляційно-інтерферометричних методів оцінки напрямку на ДРВ з використанням АР, які ефективно реалізуються у цифровій формі. Ці методи використовують багатоітераційний компенсаційний алгоритм оцінки затримки прийому радіовипромінювання рознесеними у просторі пеленгаційними каналами. Це обумовлює низьку швидкодію пеленгування.

У роботах [6–8] проведено дослідження ефективності та оптимізація методів оцінки напрямку на ДРВ з використанням АР, визначено оптимальні співвідношення параметрів АР та парціальних ДС антен для ефективної просторової селекції.

У роботі [9] наведено результати досліджень алгоритмів обробки радіовипромінювань та параметрів цифрових кореляційних пеленгаторів з АР різної конфігурації. Показано доцільність їх застосування в умовах складної ЕМО.

У роботах [10, 11] досліджено спектральні методи пеленгування, що забезпечують високе просторове розділення. Такі методи мають ряд суттєвих недоліків, таких як велика тривалість обробки сигналів, необхідність апріорної інформації про кількість прийнятих радіовипромінювань, зміщення оцінок напрямків на ДРВ та втрата стійкості роботи при низьких (менше 10 дБ) вхідних відношеннях сигнал/шум, що погіршує точність пеленгування. Часова ефективність застосування таких методів пеленгування в системах радіомоніторингу, що визначається, в першу чергу, відношенням швидкодія/точність низька. Тому в сучасних цифрових пеленгаторах систем радіомоніторингу такі методи не використовуються [1].

В цілому оптимізація безпошукових методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування з використанням реконструювання комплексного аналітичного сигналу в розглянутих роботах не проведена.

Таким чином, для використання в автоматизованих системах радіомоніторингу розробка, дослідження та параметрична оптимізація безпошукових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є актуальною задачею.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Виконаємо оптимізацію безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням комплексного аналітичного

сигналу та використанням лінійної АР, що забезпечує максимальну завадостійкість.

Нехай приймається корисний сигнал $S(t)$ з рівномірним енергетичним спектром лінійною АР із Z ідентичних пеленгаційних радіоканалів. Радіоканали АР мають власні шуми $n_z(t)$ з нульовим математичним очікуванням та однаковою двосторонньою спектральною густиною потужності, що постійна в межах смуги частот аналізу $[\omega_H; \omega_B]$. Будемо вважати, що власні шуми радіоканалів АР не мають міжканальної кореляції та кореляції з сигналом. Рівень бічних пелюсток синтезованих Z парціальних ДС визначається ваговою функцією $W_\theta(z)$ і забезпечує необхідну селекцію зовнішніх завад за напрямком до рівня, що менше рівня власних шумів $n_z(t)$ АР. Також будемо вважати, що фазові флуктуації на шляху поширення сигналу відсутні. Таким чином, початкові умови досліджень можуть бути представлені наступним чином:

$$U_z(t) = S_z(t - \tau_z) + n_z(t). \quad (1)$$

Будемо вважати, що при реалізації реконструювання застосовуються частотна та просторова селекції.

Для вказаних умов (1) як основний показник точності пеленгування доцільно використовувати дисперсію σ_θ^2 похибки оцінки напрямку на ДРВ [1, 12], яка визначається для цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням комплексного аналітичного сигналу згідно з рівнянням [2]:

$$\sigma_\theta^2 = \frac{K_{W_I} \cdot K_{W_\theta} \cdot m_S \cdot (c/d)^2}{\mu_{ВХ} \cdot \Delta f_k \cdot Z \cdot W_\theta(z_1) \cdot W_\theta(z_2) \cdot \omega_0^2 \cdot T_a \cdot (z_2 - z_1)^2 \cdot \cos^2 \theta}. \quad (2)$$

Для реалізації параметричної оптимізації методу, що розглядається, визначимо вид цільової функції та функції зв'язку [11]. Для цього на основі рівнянь (1) та (2) виконаємо аналіз особливостей реалізації методу пеленгування, що оптимізується.

Аналіз рівнянь (1) та (2) показав, що дисперсія σ_θ^2 суттєво залежить від способу реалізації процедури реконструювання комплексного аналітичного сигналу в межах апертури АР. При цьому такі параметри пеленгатора, як Z , Δf_k та $\mu_{ВХ}$ мають суттєві обмеження при оптимізації з урахуванням можливостей сучасної технічної реалізації та вимог до компактності та ціни пеленгатора [6].

При цьому такі параметри, як K_{W_I} , K_{W_θ} , m_S визначаються вимогами до завадозахищеності пеленгування в умовах складної ЕМО для забезпечення ефективної частотної та просторової селекції станційних завад та завад перевідбиття. Тому їх варіація з метою

оптимізації завадостійкості пеленгування також суттєво обмежена.

В свою чергу, параметри випромінювання ДРВ, що пеленгується, такі як ω_0 та θ на алгоритм пеленгування не впливають і мають тільки глобальне обмеження по діапазону робочих частот та ширині просторового сектора пеленгування. Тривалість T_a аналізу радіовипромінювань, що приймаються одночасно в межах смуги частот Δf_k , суттєво впливає на завадостійкість та швидкодію пеленгування, але на реалізацію алгоритму в цілому та процедури реконструювання комплексного аналітичного сигналу не впливає.

Аналіз рівняння (2) показує, що суттєвий вплив на завадостійкість пеленгування та дисперсію σ_θ^2 мають абсолютні значення z_1 та z_2 номерів вибраних елементів АР та їх рознесення $\Delta z = (z_2 - z_1)$, а також значення функції вікна $W_\theta(z_1)$ і $W_\theta(z_2)$, що визначають спосіб реалізації процедури реконструювання комплексного аналітичного сигналу. Аналіз показав, що вказана залежність $\sigma_\theta^2 = F(z_1, z_2, \Delta z)$ визначається двома антагоністичними чинниками. Перший чинник $(z_2 - z_1)^2$ впливу рознесення Δz зумовлює суттєве квадратичне зменшення σ_θ^2 при збільшенні Δz . Другий чинник $W_\theta(z_1) \cdot W_\theta(z_2)$, навпаки, зумовлює суттєве збільшення σ_θ^2 при збільшенні Δz . Тому з урахуванням чинників $(z_2 - z_1)^2$, $W_\theta(z_1)$ та $W_\theta(z_2)$ доцільно здійснити оптимізацію досліджуваного методу пеленгування для забезпечення максимальної завадостійкості.

Таким чином, з урахуванням проведеного аналізу рівняння (2) доцільно визначити вид цільової функції $F(z_1, z_2)$ і критерій оптимальності наступним чином:

$$F(z_1, z_2) = K_\sigma \cdot W_\theta(z_1) \cdot W_\theta(z_2) \cdot (z_2 - z_1)^2 = \max. \quad (3)$$

З урахуванням (3) задача оптимізації набуває вигляду:

$$(z_1, z_2)_{opt} = \arg \max \{F(z_1, z_2)\}. \quad (4)$$

Аналіз рівнянь (3) та (4) показує, що задачу оптимізації доцільно вирішувати на основі скалярних багатовимірних методів з пошуком екстремуму типу \max [13].

Визначимо вид функцій зв'язку $F(z_1, z_2)$, їх кількість і вид шуканого екстремуму, що необхідні для реалізації подальшої оптимізації.

По-перше, кореляційно-інтерферометричне пеленгування в цілому повинно здійснюватись безпошуковим методом, тобто за умови:

$$N_C = 1. \quad (5)$$

По-друге, змінні z_1 та z_2 можуть змінюватись в межах усієї апертури АР, тобто:

$$\begin{aligned} (Z - 1) > z_1 > 0; \\ (Z - 1) > z_2 > 0; \\ z_2 > z_1. \end{aligned} \quad (6)$$

З урахуванням (5) та (6) можемо зробити висновки, що оптимізація повинна здійснюватись з урахуванням чотирьох функцій зв'язку і пошуком глобального умовного екстремуму типу \max .

В загальному випадку функція $W_\theta(z)$ є нелінійною, тому для вирішення поставленої задачі оптимізації доцільно використовувати методи нелінійного програмування [13]. Для спрощення подальших обчислень виконаємо аналіз особливостей розподілу відліків комплексного аналітичного сигналу $S_a(jz)$ та його сигнальної $S_{aS}(jz)$ і адитивної $S_{aN}(jz)$ шумової складових в межах апертури АР при його реконструюванні на основі виділеної сигнальної групи із m_S відліків [1]:

$$S_a(jz) = S_{aS}(jz) + S_{aN}(jz). \quad (7)$$

Аналіз рівняння (2) дисперсії σ_θ^2 похибки пеленгування показує, що рівень сигнальної складової $S_{aS}(jz)$ аналітичного сигналу в межах апертури АР суттєво змінюється і визначається ваговою функцією $W_\theta(z)$ синтезу багатопелюсткової ДС. Максимальне значення модуля сигнальної складової $S_{aS}(z)$ відповідає середній точці, тобто центральному елементу z_C апертури АР, тобто $\max[S_{aS}(z)] = S_{aS}(z_C)$. При зміщенні ліворуч та праворуч від z_C рівень сигнальної складової аналітичного сигналу симетрично монотонно зменшується, тобто $S_{aS}(z_C \pm \Delta z) < S_{aS}(z_C)$ при $S_{aS}(z_C + \Delta z) = S_{aS}(z_C - \Delta z)$ і визначається згідно з рівнянням:

$$S_{aS}(z) = S_{aS}(z_C) \cdot W_\theta(z). \quad (8)$$

Така залежність модуля сигнальної складової $S_{aS}(z)$ визначається когерентністю аргументів m_S сигнальних складових виділеної сигнальної групи.

З урахуванням співвідношень (3), (7) та (8) доцільно виділити два часткових варіанта реалізації цільової функції $F_1(z_1, z_2)$. Перший варіант $F_1(z_1, z_2)$ визначається симетричним розподілом номерів вибраних антенних елементів АР z_1 та z_2 відносно z_C АР:

$$\begin{aligned} F_1(z_1, z_2) &= K_\sigma \cdot W_\theta(z_1) \cdot W_\theta(z_2) \cdot (z_2 - z_1)^2 = \\ &= K_\sigma \cdot W_\theta(z_C - \Delta z / 2) \cdot W_\theta(z_C + \Delta z / 2) \cdot \Delta z^2 = \\ &= K_\sigma \cdot W_\theta^2(z_C - \Delta z / 2) \cdot \Delta z^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Доцільність першого варіанта (9) реалізації цільової функції $F_1(z_1, z_2)$ визначається тим, що значення вагової функції вікна $W_\theta(z)$ є додатні і не перевищують одиниці, а локальні максимальні значення добутку $W_\theta(z_1) \cdot W_\theta(z_2) \cdot (z_2 - z_1)^2$ визначаються за умови саме симетричного розподілу номерів z_1 та z_2 відносно вибраної точки z_h симетрії на апертурі АР:

$$\begin{aligned} W_\theta(z_h - \Delta z/2) \cdot W_\theta(z_h + \Delta z/2) \cdot \Delta z^2 < \\ < W_\theta(z_C - \Delta z/2) \cdot W_\theta(z_C + \Delta z/2) \cdot \Delta z^2, \end{aligned} \quad (10)$$

при $z_h \neq z_C, 1 \leq z_h < Z$.

Аналіз рівнянь (9) та (10) показує, що при виборі симетричного розподілу номерів вибраних антенних елементів АР z_1 та z_2 відносно вибраного центрального елемента, для отримання глобального максимуму цільової функції $F_1(z_1, z_2)$ середню точку доцільно обрати як центральний елемент z_C апертури АР.

Другий варіант $F_2(z_1, z_2)$ реалізації цільової функції $F(z_1, z_2)$ визначається несиметричним розподілом номерів z_1 та z_2 вибраних антенних елементів в межах апертури АР: значення z_1 відповідає середній точці z_C апертури АР, де рівень сигнальної складової $S_{aS}(z)$ є максимальним, а значення z_2 відповідає розміщенню периферійних точок апертури АР, тобто:

$$\begin{aligned} F_2(z_1, z_2) &= K_\sigma \cdot W_\theta(z_C) \cdot W_\theta(z_2) \cdot (z_2 - z_C)^2 = \\ &= K_\sigma \cdot W_\theta(z_2) \cdot (z_2 - Z/2)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

де $z_1 = z_C, W_\theta(z_C) = 1, |\Delta z| = |z_2 - z_C| \leq Z/2$.

Аналіз рівняння (11) показує, що несиметричний розподіл значень номерів z_1 та z_2 в межах апертури АР дозволяє фактично зменшити кількість змінних цільової функції до однієї, а також використати найкращі умови оцінки різниці $\Delta \psi_a$ аргументів комплексного аналітичного сигналу $S_a(jz)$ за відношенням сигнал/шум.

Виконаємо аналіз особливостей розподілу значення шумової складової $S_{aN}(jz)$ комплексного аналітичного сигналу.

Шумова складова $S_{aN}(jz)$ формується як сума m_S гармонічних шумових складових $S_{aN,m}(jz)$ сигнальної групи, тобто:

$$S_{aN}(jz) = \sum_{m=1}^{m_S} S_{aN,m}(jz). \quad (12)$$

Кожна шумова складова $S_{aN,m}(jz)$ є вузькосмуговим випадковим процесом з нормальним розподілом густини імовірності відліків [12]. В результаті, шумова складова $S_{aN}(jz)$ аналітичного сигналу в цілому також буде нормальним вузькосмуговим випадковим процесом. Потужність P_{aN} шумової складової $S_{aN}(jz)$ дорівнює сумі потужностей її m_S складових $S_{aN,m}(jz)$:

$$P_{aN} = \sum_{m=1}^{m_S} P_{aN,m}. \quad (13)$$

Шумова складова $S_{aN}(jz)$ аналітичного сигналу має також певний інтервал кореляції $\Delta z_{\text{кор}}$, що визначається кількістю m_S її гармонічних шумових складових сигнальної групи [12]:

$$\Delta z_{\text{кор}} = \frac{d \cdot Z}{m_S}. \quad (14)$$

Аналіз рівняння (14) показує, що для ефективної статистичної оцінки різниці аргументів аналітичного сигналу $S_a(jz)$ необхідно, щоб рознесення Δz між вибраними елементами АР було не менше інтервалу кореляції $\Delta z_{\text{кор}}$ [12]:

$$z_2 - z_1 \geq \Delta z_{\text{кор}}. \quad (15)$$

Вимога (15) забезпечує максимальну некорельованість та статистичну незалежність шумових складових відліків різниці аргументу аналітичного сигналу $S_a(jz)$, що, в свою чергу, забезпечує максимальну ефективність їх подальшого статистичного оброблення при дисперсійно-кореляційному аналізі для великої антенної бази [1].

Таким чином, до сукупності функцій зв'язку, окрім (5) та (6), доцільно включити умову (15).

З урахуванням отриманих виразів для цільових функцій $F_1(z_1, z_2)$ та $F_2(z_1, z_2)$, а також функцій зв'язку (5), (6) та (16) відповідні рівняння оптимізації матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} (z_1, z_2)_{\text{opt1}} &= \arg \max \{F_1(z_1, z_2)\}; \\ (z_2)_{\text{opt2}} &= \arg \max \{F_2(z_2)\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Оптимальні значення номерів z_1 та z_2 з урахуванням рівнянь (16) визначимо як розв'язок відповідних диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} (z_1, z_2)_{\text{opt1}} &= (\Delta z)_{\text{opt1}} = \arg \left\{ \frac{\partial F_1(z_1, z_2)}{\partial \Delta z} = 0 \right\}; \\ (z_2)_{\text{opt2}} &= (\Delta z)_{\text{opt2}} = \arg \left\{ \frac{\partial F_2(z_2)}{\partial z_2} = 0 \right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для розв'язку рівнянь (17) використаємо програмний пакет MathCad. Для наочності та перевірки правильності розв'язку рівнянь (17) з використанням рівнянь (9) та (11) досліджуваних цільових функцій $F_1(z_1, z_2)$ та $F_2(z_2)$ побудуємо їх теоретичні залежності від Δz для несиметричного (рис. 1, ряд 1) та симетричного (рис. 1, ряд 2) варіантів рознесення елементів АР з номерами z_1 та z_2 . При цьому використаємо одну з типових для радіомоніторингу вагову функцію $W_\theta(z)$ Блекмана 3-го порядку та кількість пеленгаційних каналів $Z = 64$.

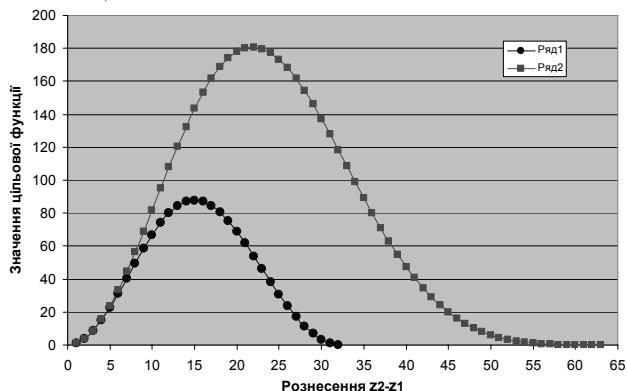


Рисунок 1 – Теоретичні залежності цільових функцій $F_1(z_1, z_2)$ та $F_2(z_2)$ від Δz

Аналіз рис. 1 показує, що цільові функції $F_1(z_1, z_2)$ та $F_2(z_2)$ мають колоколоподібний вигляд з одним максимумом. При симетричному оптимальному рознесенні $\Delta z = 22$ відносного центрального $z_C = 32$ елемента АР максимальне значення цільової функції $F_1(z_1, z_2)$, ряд 2, буде досягатися при $(z_1, z_2)_{opt1} = (21; 43)$. При несиметричному оптимальном рознесенні $\Delta z = 15$ максимальне значення цільової функції $F_2(z_2)$, ряд 1, буде забезпечуватися при $z_1 = 32$ і $(z_2)_{opt2} = 47$. При цьому, оскільки $\arg\{F_1(z_1, z_2)\}_{(z_1, z_2)_{opt1}} > \arg\{F_2(z_2)\}_{(z_2)_{opt2}}$, можемо зробити висновок про доцільність використання симетричного рознесення $\Delta z = 22$ для максимізації заданої цільової функції $F(z_1, z_2)$ та відповідно мінімізації дисперсії σ_θ^2 похибки оцінки напрямку на ДРВ.

Таким чином, задача оптимізації безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу і визначення $(z_1, z_2)_{opt1}$ та значення рознесення Δz між обраними елементами АР, в яких розраховується комплексний аналітичний сигнал, вирішена.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

За допомогою розробленої програмної моделі в середовищі MathCad проведено моделювання роботи пеленгатора згідно з розробленим алгоритмом безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу [1]. Моделювання виконано для таких початкових умов: тип сигналу – неперервний з лінійною частотною модуляцією: $S(t) = A \cdot \sin(\omega_0 t + bt^2)$; ширина спектра сигналу $\Delta f_S = 0,6$ МГц; смуга частот аналізу пеленгаційного радіоканалу $\Delta f_k = 10$ МГц; частота несучої сигналу $f_S = 2$ ГГц; частота дискретизації $f_d = 2\Delta f_k = 20$ МГц; кількість часових відліків сигналу $N_S = 2048$; тривалість процесу аналізу $T_a = 0,1$ мс; використана лінійна АР з кількістю каналів прийому $Z = 64$; крок АР $d = 0,05$ м; вибрана кількість гармонік сигнальної групи для реконструювання просторового аналітичного сигналу $m_S = 6$; тип вікон K_{Wt} , $K_{W\theta}$ – Блекмана 3-го порядку.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

В результаті моделювання отримано сімейство залежностей методичної похибки $\Delta\theta$ оцінки пеленга від величини Δz обраних елементів АР без урахування дії шумів, рис. 2.

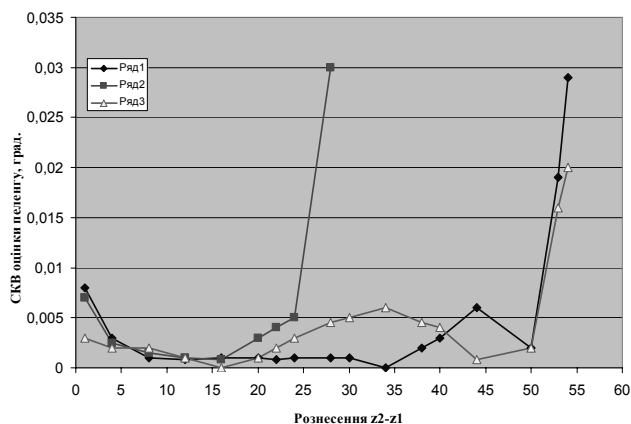


Рисунок 2 – Сімейство залежностей методичної похибки $\Delta\theta$ оцінки пеленга від величини Δz без урахування дії шумів

На рис. 2 показано:

ряд 1 – для умови використання симетричного щодо центра $z_C = 32$ АР рознесення обраних елементів АР при заданому напрямку на ДРВ;

ряд 2 – для умови використання несиметричного щодо центра АР рознесення обраних елементів АР: елемент $z_1 = 32$ вибираємо в центрі АР, а z_2 зміщуємо з одиничним кроком до краю АР;

ряд 3 – для умови використання симетричного щодо центра АР рознесення обраних елементів АР при заданому напрямку на ДРВ $\theta = 45^\circ$.

Аналіз рис. 2 показує, що залежність методичної похибки $\Delta\theta$ оцінки пеленга має коливальний нестабільний характер при зміні заданого напрямку на ДРВ, але монотонно зменшується до певного значення величини рознесення Δz обраних елементів АР. Мінімум методична похибка $\Delta\theta$ оцінки пеленга досягається при рознесенні $\Delta z = 15$ для умови використання несиметричного щодо центра АР рознесення, а при рознесенні $\Delta z = 20$ – для умови використання симетричного щодо центра АР рознесення.

Досліджено залежність СКВ оцінки пеленга σ_θ від величини рознесення Δz обраних елементів АР при заданому відношенні сигнал/шум $\mu_{\text{вх}} = 0\text{дБ}$ на вході пеленгаційних радіоканалів.

При моделюванні отримано сімейство залежностей σ_θ від величини рознесення Δz обраних елементів АР і напрямку θ на ДРВ для двох варіантів рознесення z_1 та z_2 при $\mu_{\text{вх}} = 0\text{дБ}$, рис. 3. Кількість дослідів для оцінки одного відліку $\sigma_\theta - 50$.

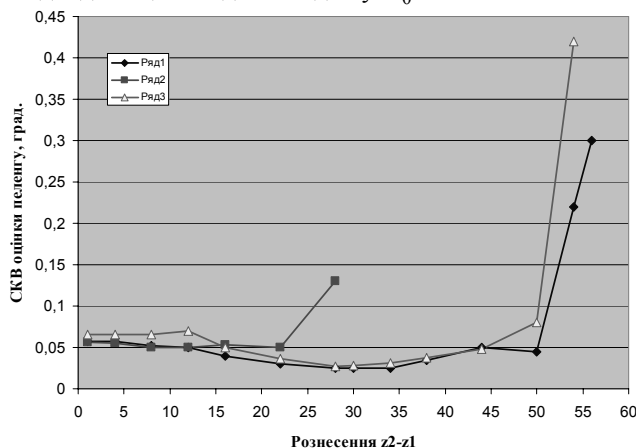


Рисунок 3 – Сімейство залежностей σ_θ від величини рознесення Δz обраних елементів АР та напрямку θ на ДРВ

Аналіз рис. 3 показує, що для симетричного рознесення (рис. 3, ряд 1, ряд 3) значення σ_θ має монотонно плавну залежність з одним мінімумом при значенні $\Delta z = 28$ незалежно від заданого напрямку на ДРВ. При несиметричному рознесенні (рис. 3, ряд 2) значення σ_θ при збільшенні рознесення Δz змінюється незначно і залишається в два рази більшим, ніж при симетричному, що підтверджує його меншу ефективність.

Можна зробити висновок, що аналітичні результати оптимізації та результати моделювання добре узгоджуються з невеликим відхиленням практичних результатів мінімізації σ_θ при низькому відношенні сигнал/шум в бік збільшення величини симетричного рознесення Δz з 22 до 28 кроків d АР. Таким чином, поставлена мета статті досягнута.

На рис. 3 показано:

ряд 1 – для умови використання симетричного щодо центра АР рознесення обраних елементів АР при заданому напрямку на ДРВ $\theta = 60^\circ$;

ряд 2 – для умови використання несиметричного щодо центра АР рознесення обраних елементів АР: елемент $z_1 = 32$ вибираємо в центрі АР, а z_2 зміщуємо з одиничним кроком до краю АР при $\theta = 60^\circ$;

ряд 3 – для умови використання симетричного щодо центра АР рознесення обраних елементів АР при заданому напрямку на ДРВ $\theta = 45^\circ$.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Теоретична оптимізація параметрів дослідженого методу показала, що доцільним є використання симетричного рознесення $\Delta z = 28$ для мінімізації дисперсії σ_θ^2 похибки оцінки напрямку на ДРВ і забезпечення максимальної точності пеленгування. Аналітичні результати оптимізації та результати моделювання узгоджуються з невеликим відхиленням практичного оптимального значення рознесення для мінімізації СКВ оцінки пеленга при низькому $\mu_{\text{вх}} = 0\text{дБ}$ відношенні сигнал/шум у напрямку збільшення значення симетричного рознесення Δz обраних елементів АР з 22 до 28 кроків d АР.

Отримані результати доцільно використовувати при реалізації апаратури систем радіомоніторингу та радіонавігації, які функціонують в складній динамічній ЕМО.

Дані дослідження є продовженням роботи по розробці безпошукових цифрових спектральних кореляційно-інтерферометричних методів пеленгування.

ПОДЯКИ

Робота виконана на базі кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету при фінансовій підтримці МОН України в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи ДР № 0119U100155.

ВИСНОВКИ

Проблема оптимізації безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу вирішена. Отримані оптимальні параметри реконструювання, що забезпечують мінімум СКВ оцінки напрямку на ДРВ.

Наукова новизна отриманих результатів. В результаті проведених досліджень виконано оптимізацію та визначено, що основними з параметрів, що входять до рівняння дисперсії похибки оцінки напрямку на ДРВ для безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу, що підлягають оптимізації, є величина рознесення ($z_2 - z_1$) між обраними елементами антенної решітки, для просторових положень яких проводиться ре-

конструювання комплексного аналітичного сигналу, та їх номери z_1 та z_2 . Проведено теоретичну оптимізацію параметрів дослідженого методу і визначено, що доцільним є використання симетричного рознесення $\Delta z = 28$ для мінімізації дисперсії σ_θ^2 похибки оцінки напрямку на ДРВ і забезпечення максимальної точності пеленгування.

Практична цінність. Експериментальні результати дозволили скоригувати алгоритми обробки сигналів і підвищити точність пеленгування без додаткових апаратних витрат. Аналітичні результати оптимізації та результати моделювання узгоджуються з невеликим відхиленням практичного оптимального значення рознесення для мінімізації σ_θ при низькому $\mu_{\text{вх}} = 0\text{дБ}$ відношенні сигнал/шум у напрямку збільшення значення симетричного рознесення Δz вибраних елементів АР з 22 до 28 кроків d АР.

У подальшому доцільно виконати дослідження закону розподілу шуму по апертурі АР для оптимізації моделей сигнальної та шумової складових аналітичного сигналу та відповідних співвідношень оцінки завадостійкості методу пеленгування.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин; под ред. А. М. Рембовского; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2010. – 624 с.
2. Tsyporenko V. V. Analysis of interference immunity of the searchless method of correlation-interferometric direction finding with reconstruction of the spatial analytical signal / V. V. Tsyporenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system. – 2017. – Vol. 2, №9(86). – P. 45–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96653
3. Ципоренко В. В. Безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу / В. В. Ципоренко // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київський політехн. ін-т». – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – № 48. – С. 75–84. – (Серія Радіотехніка. Радіоапаратурубудування).
4. Jung-Hoon L. Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations / L. Jung-Hoon, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Vol. 14. – P. 719–722. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source / [Y. Jian, C. Wangjie, L. Lei, N. Xiaokang] // Signal Processing: 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, 2014: proceedings. – Mengqi Zhou, 2014. – P. 52–57. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Optimized algorithm for solving phase interferometer ambiguity / [S. Van Doan, J. Vesely, P. Janu et al.] // 17th International Radar Symposium IRS-2016, Poland, 2016: proceedings. – Krakow, 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IRS.2016.7497353
7. Houcem G. Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources / G. Houcem, P. D. Jean, M. J. Larsys Sergio // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2016. – Vol. 52, № 4. – P. 1995–2003. DOI: 10.1109/TAES.2016.150655
8. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT / [F. Xiao, N. D. Sidiropoulos, M. Wing-Kin, J. Tranter] // 39th International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP, Italy, 4–9 May, 2014: proceedings. – Florence, 2014. – P. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108
9. Yingbing W. Studies on circular array interferometer direction finding / W. Yingbing, N. Lirong // 2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE), China, 2015: proceedings. – Shanghai, 2015. – P. 49–52. DOI: 10.1109/MAPE.2015.7510262
10. Low-complexity range and angle two-dimensional gold-MUSIC for multi-carrier frequency MIMO radar / [X. Mengying, S. Weimin, G. Hong et al.] // Electronics Letters. – 2018. – Vol. 54, № 18. – P. 1088–1089. DOI: 10.1049/el.2018.5261
11. Real time ambiguity resolution in hybrid amplitude/phase comparison direction finding systems / [A. Emin Gürel, A. Orduyilmaz, M. Serin et al.] // 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Turkey, 2–5 May, 2018: proceedings. – Izmir, 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIU.2018.8404681
12. Тихонов В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов: учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.: ил.
13. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества / Л. С. Гуткин. – М.: Сов. радио, 1975.

Received 03.04.2019.
Accepted 16.06.2019.

УДК 621.37:621.391

ОПТИМИЗАЦИЯ БЕСПОИСКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИОННО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ С РЕКОНСТРУИРОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Ципоренко В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Биомедицинской инженерии и телекоммуникаций Житомирского государственного технологического университета, Житомир, Украина.

Ципоренко В. Г. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Биомедицинской инженерии и телекоммуникаций Житомирского государственного технологического университета, Житомир, Украина.

Нікітчук Т. Н. – канд. техн. наук, доцент, завідувача кафедри Біомедицинської інженерії та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. На сегодня в автоматизированных системах радиомониторинга пеленгование радиоэлектронных средств осуществляется в условиях сложной электромагнитной обстановки, большой априорной неопределенности относительно параметров радиоизлучений, а также в условиях реального масштаба времени реализации. Перспективным направлением для указанных условий является использование широкополосных корреляционно-интерферометрических радиопеленгаторов с применением цифровой обработки комплексных спектров принятой смеси радиоизлучений.

Цель. Целью статьи является исследование и оптимизация беспойскового цифрового метода корреляционно-интерферометрического пеленгования с реконструированием пространственного аналитического сигнала.

Метод. В работе выполнен анализ особенностей реализации и точности исследованного метода пеленгования, а также аналитическая оптимизация беспойскового цифрового метода корреляционно-интерферометрического пеленгования с реконструированием пространственного аналитического сигнала.

Результаты. Определены параметры, входящие в уравнение дисперсии погрешности оценки направления на источник радиоизлучения для беспойскового цифрового метода корреляционно-интерферометрического пеленгования с реконструированием пространственного аналитического сигнала, которые подлежат оптимизации. Показано, что основными параметрами, которые целесообразно оптимизировать, являются величина разнесения между выбранными элементами антенной решетки, для пространственных положений которых проводится реконструирование комплексного аналитического сигнала, и их номера. Проведена теоретическая оптимизация параметров исследованного метода, а также выполнен сравнительный анализ аналитических расчетов и результатов моделирования. В результате моделирования получена зависимость методической погрешности оценки пеленга и средней квадратической оценки пеленга от значений оптимизированных параметров при действии нормального гауссовского шума.

Выводы. Проведена теоретическая оптимизация параметров исследованного метода и определено, что целесообразным является использование симметричного разнесения на 28 шагов 64-элементной антенной решетки для минимизации дисперсии погрешности оценки направления на источник радиоизлучения и обеспечения максимальной точности пеленгования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оптимизация; беспойсковый цифровой метод; корреляционно-интерферометрическое пеленгование; реконструирование пространственного аналитического сигнала.

UDC 621.37:621.391

OPTIMIZATION OF DIRECT DIGITAL METHOD OF CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDING WITH RECONSTRUCTION OF SPATIAL ANALYTICAL SIGNAL

Tsyborenko V. V. – PhD, Associate professor, Associate professor of Biomedical engineering and telecommunications Department, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine.

Tsyborenko V. G. – PhD, Associate professor, Associate professor of Biomedical engineering and telecommunications Department, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine.

Nikitczuk T. M. – PhD, Associate professor, Head of Biomedical engineering and telecommunications Department, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine.

ABSTRACT

Context. At present, in automated radio monitoring systems, direction-finding of radio-electronic means is carried out under conditions of a complex electromagnetic environment, a large a priori uncertainty about the parameters of radio emissions, as well as real-time implementation. A promising direction for these conditions is the use of broadband correlation-interferometric radio direction finders using digital processing of the complex spectrum of the received mixture of radio emissions.

Objective. The aim of the article is to study and optimize the direct digital method of correlation-interferometric direction finding with reconstruction of the spatial analytical signal.

Method. The paper analyzes the features of the implementation and accuracy of the direction-finding method studied, as well as analytical optimization of the non-exploratory digital method of correlation-interferometric direction finding with reconstruction of the spatial analytical signal.

Results. The parameters that are included in the dispersion equation for the error in estimating the direction to the radio source for the non-exploratory digital method of correlation-interferometric direction finding with reconstruction of the spatial analytical signal that are to be optimized are determined. It is shown that the main parameters that it is advisable to optimize are the separation distance between the selected elements of the antenna array, for the spatial positions of which the complex analytical signal is reconstructed, and their numbers. A theoretical optimization of the parameters of the studied method, as well as a comparative analysis of analytical calculations and simulation results were carried out. As a result of modeling, the dependence of the method error of the bearing estimate and of the average square estimate of the bearing under the action of normal Gaussian noise on the values of the optimized parameters was obtained.

Conclusions. A theoretical optimization of the parameters of the studied method has been carried out and it has been determined that it is advisable to use the symmetric separation of the 64-element antenna array by 28 steps to minimize the variance of the error in estimating the direction to the radiation source and to ensure maximum accuracy of direction finding.

KEYWORDS: optimization; direct digital method; correlative-interferometric direction finding; reconstruction of spatial analytical signal.

REFERENCES

1. Rembovskiy A. M., Ashychmin A. V., Kozmin V. A.; pod red. A. M. Rembovskogo Radiomonitoring. zadaczi, metody, sredstva, 2-ye izd., pererab. i dop. Moscow, Goriacziaya liniya, Telekom, 2010, 624 p.
2. Tsyoporenko V. V. Analysis of interference immunity of the searchless method of correlation-interferometric direction finding with reconstruction of the spatial analytical signal, *Eastern European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system*, 2017, Vol. 2, No. 9(86), pp. 45–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96653
3. Tsyoporenko V. V. Bezposhukovyi tsyfrovyi metod koreliatsiino-interferometrychnoho pelenhuvannia z rekonstruiuvanniam prostorovoho analitychnoho syhnalu, *Visn. Nats. tekhn. un-tu Ukrainy "Kyivskiy politekhn. in-t"*. Kyiv, NTUU «KPI», 2012, No 48, pp. 75–84. (Seria Radiotekhnika. Radioaparaturubuduvannia).
4. Jung-Hoon L., Jong-Myung W. Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, Vol. 14, pp. 719–722. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Jian Y., Wangjie C., Lei L., Xiaokang N. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source, *Signal Processing : 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, 2014, proceedings*. Mengqi Zhou, 2014, pp. 52–57. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Van Doan S., Vesely J., Janu P., Hubacek P., Luong Tran X. Optimized algorithm for solving phase interferometer ambiguity, *17th International Radar Symposium IRS-2016, Poland, 2016 : proceedings*. Krakow, 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IRS.2016.7497353
7. Houcem G., Jean P. D., Larsys Sergio M. J. Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 1995–2003. DOI: 10.1109/TAES.2016.150655
8. Xiao F., Sidiropoulos N. D., Wing-Kin M., Tranter J. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT, *39th International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP, Italy, 4–9 May, 2014, proceedings*, Florence, 2014, pp. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108
9. Yingbing W., Lirong N. Studies on circular array interferometer direction finding, *2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE), China, 2015 : proceedings*. Shanghai, 2015, pp. 49–52. DOI: 10.1109/MAPE.2015.7510262
10. Mengying X., Weimin S., Hong G., Zheng D., Wenjuan L., Jianchao Y. Low-complexity range and angle two-dimensional gold-MUSIC for multi-carrier frequency MIMO radar, *Electronics Letters*, 2018, Vol. 54, No. 18, pp. 1088–1089. DOI: 10.1049/el.2018.5261
11. Emin Gürel A., Orduyilmaz A., Serin M., Yildirim A., Soy-sal G. Real time ambiguity resolution in hybrid amplitude/phase comparison direction finding systems, *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Turkey, 2–5 May, 2018 : proceedings*. Izmir, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIU.2018.8404681
12. Tikhonov V. Y., Kharisov V. N. Statisticheskii analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem, *Uchebnoe posobie dlia vuzov*. Moscow, Radio y sviaz, 1991, 608 p.: il.
13. Hutkin L. S. Optimizatsiia radioelektronnykh ustroystv po sovokupnosti pokazatelei kachestva. Moscow, Sov. radio, 1975.