

В.В. Ципоренко, асист.

Житомирський державний технологічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КОМПЛЕКСНОГО СПЕКТРАЛЬНО-КОРЕЛЯЦІЙНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

(Представлено д.т.н., проф. Манойловим В.П.)

Розроблено оптимальний алгоритм комплексного спектрально-кореляційного пеленгування з використанням антенної решітки, що забезпечує мінімум дисперсії похибки пеленгування при обмежених часових та апаратурних витратах. Визначено оптимальне співвідношення двох комплексних багатопелюсткових діаграм спрямованості пеленгатора та спосіб їх синтезу.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. На сьогодні радіомоніторинг радіоелектронних засобів повинен здійснюватися в умовах складної електромагнітної обстановки, великої апріорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань і при багатопроменевому їх розповсюдженні, а також в умовах реального масштабу часу реалізації. Перспективним напрямком реалізації радіомоніторингу для вказаних умов є використання радіопеленгаторів з антенними решітками, керування діаграмою спрямованості яких здійснюється цифровими методами.

Зазвичай пеленгування реалізується амплітудним методом з пошуком такого напрямку спрямованості антени, який забезпечує максимальний рівень прийнятого випромінювання, недоліком якого є великі часові або апаратурні витрати. Розробка швидкого комплексного спектрально-кореляційного методу пеленгування та оптимізація його параметрів, з метою забезпечення максимально можливої точності при незмінних апаратурних витратах, є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми. В роботах [1, 2] виконано дослідження спектральних методів визначення напрямку на джерело випромінювання з використанням антенних решіток (АР), що ефективно реалізуються в цифровій формі і їх порівняльний аналіз. Однак, вказані методи використовують енергетичний аналіз і відповідні варіанти амплітудного методу пеленгування, що визначає їх відносно великі часові витрати у порівнянні з фазовим, амплітудно-фазовим та комплексним методами.

У роботі [3] виконано дослідження властивостей фазових діаграм спрямованості (ДС) антен та запропоновані методи їх вибору і розрахунку. Але в роботі не визначені принципи та методи цілеспрямованого використання фазових діаграм спрямованості при розробці та оптимізації радіопеленгаторів, що обмежує ефективність їх використання.

У роботі [4] запропоновані ефективні алгоритми цифрового апертурного синтезу на основі багатоелементних антен кільцевої конфігурації з використанням спеціальних методів формування променя, в тому числі з високим розрізненням. Запропоновані алгоритми скорочують обчислювальні витрати у порівнянні з прямим синтезом, використовуючи швидке перетворення Фур'є. Однак запропоновані алгоритми враховують тільки амплітудні характеристики антен, що суттєво обмежує їх ефективність та точність.

У роботах [5, 6] виконано синтез та порівняльний аналіз багатоканальних моноімпульсних радіопеленгаторів, в тому числі комбінованих, що використовують тільки просторово-часову обробку радіосигналів. Однак, в даних роботах не розглянуті методи пеленгування з використанням комплексних діаграм спрямованості антен з метою підвищення їх швидкодії.

У роботі [7] виконано розробку алгоритму комплексного пеленгування з використанням лінійної антенної решітки та цифрового синтезу її діаграми спрямованості. Виконано дослідження швидкодії алгоритму комплексного пеленгування, що підтверджують його ефективність. Але в роботі не виконано дослідження з оптимізації розробленого алгоритму, що обмежує ефективність його використання.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Таким чином, невирішеною раніше частиною загальної проблеми підвищення швидкодії радіопеленгаторів з використанням антенних решіток є оптимізація швидкого комплексного спектрально-кореляційного методу пеленгування.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Відповідно до невирішених раніше частин загальної проблеми підвищення швидкодії радіопеленгаторів з використанням антенних решіток, цілями статті є: розробка оптимального алгоритму комплексного спектрально-кореляційного пеленгування з використанням антенної решітки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Виконаємо дослідження та оптимізацію параметрів алгоритму комплексного спектрально-кореляційного пеленгування з використанням АР, що забезпечить

мінімум дисперсії похибки пеленгування. Однією з основних операцій цього алгоритму є синтез двох комплексних багатопелюсткових ДС. Регульованим параметром цієї операції при умові забезпечення максимальної роздільної просторової здатності є форма комплексної ДС пелюсток другої багатопелюсткової ДС. Кількісними параметрами форми багатопелюсткової ДС є еквівалентна шумова ширина амплітудної ДС та крутизна фазової ДС її пелюсток. При лінійному цифровому спектральному методі синтезу багатопелюсткової ДС шумова ширина амплітудної ДС та крутизна фазової ДС визначаються формою вагової функції W_θ масиву спектральних відліків пеленгаційних каналів та його сигнальних відліків кількістю L_2 .

Максимальна роздільна просторова здатність забезпечується максимізацією кількості L_1 сигнальних відліків першої багатопелюсткової ДС та відповідним видом вагової функції [8–10]. Вид вагової функції W_θ також суттєво впливає на просторову селективність через рівень бічних пелюсток $A_{БП}$, шумову ширину $\Delta\theta_w$ та ширину на рівні бічних пелюсток $\Delta\theta_{БП}$. Тому оптимізація операції синтезу багатопелюсткової ДС може бути здійснена при вибраних априорі L_1 кількості сигнальних відліків першої багатопелюсткової ДС та виду вагової функції W_θ тільки регулюванням кількості L_2 сигнальних відліків при синтезі другої багатопелюсткової ДС.

Визначимо оптимальне значення L_2 і відповідно форми другої комплексної багатопелюсткової ДС, що забезпечують мінімум дисперсії похибки пеленгування. Дисперсія похибки пеленгування $\sigma_{\Delta\theta}^2$ при синтезі першої та другої багатопелюсткової ДС визначається дисперсією $\sigma_{\Delta\varphi}^2$ взаємного фазового спектра та різницевою крутизною фазової ПХ [11, 12]:

$$\sigma_{\Delta\theta}^2 = \frac{K_\varphi \cdot \sigma_{\Delta\varphi}^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2}, \quad (1)$$

де K_φ – коефіцієнт пропорційності;

$\sigma_{\Delta\varphi}^2$ – дисперсія взаємного фазового спектра;

$(\rho_1 - \rho_2)$ – різниця крутизна фазової ПХ.

У свою чергу дисперсія $\sigma_{\Delta\varphi}^2$ взаємного фазового спектра визначається величиною шумової ширини першої та другої пелюсток багатопелюсткової ДС [9, 11, 12]:

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2 = \sigma_{\varphi 1}^2 + \sigma_{\varphi 2}^2, \quad (2)$$

де $\sigma_{\varphi 1}^2 = \Delta\theta_{w1} \cdot N_{w\theta} = \frac{N_w \cdot K_w}{2P_S \cdot dL_1}$;

$\sigma_{\varphi 2}^2 = \Delta\theta_{w2} \cdot N_{w\theta} = \frac{N_w \cdot K_w}{2P_S \cdot dL_2}$;

$N_{w\theta}$ – спектральна густина потужності шуму пеленгаційних каналів АР, приведена до їх входу;

$\Delta\theta_{w1}$, $\Delta\theta_{w2}$ – еквівалентна шумова ширина діаграми спрямованості пелюстки відповідно першої та другої багатопелюсткової ДС;

K_w – коефіцієнт, що враховує вид вагової функції W_θ ;

P_S – потужність корисного сигналу;

d – крок АР.

Крутизна фазової ДС першої та другої пелюсток багатопелюсткової ДС в свою чергу визначається згідно з рівняннями [8, 13]:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \pi d \cdot L_1 \\ \rho_2 &= \pi d \cdot L_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Враховуючи рівняння (2) та (3), рівняння (1) набуде вигляду:

$$\sigma_{\Delta\theta}^2 = \frac{K_\varphi \cdot N_w (L_1 + L_2)}{2P_S \cdot d^3 (L_1 \cdot L_2) (L_1 - L_2)^2}. \quad (4)$$

Аналіз рівняння (4) показує, що регулювання L_2 кількості сигнальних відліків при синтезі другої багатопелюсткової ДС впливає на точність пеленгування $\sigma_{\Delta\theta}^2$ через дві протилежні залежності. З однієї сторони, при зменшенні L_2 згідно з рівнянням (2) збільшується пропорційно дисперсія фазового взаємного спектра $\sigma_{\Delta\varphi}^2$ і відповідно загальна дисперсія похибки пеленгування $\sigma_{\Delta\theta}^2$. З іншої сторони,

зменшення L_2 зумовлює зменшення крутизни ρ_2 фазової ДС пелюсток другої багатопелюсткової ДС і збільшення різницевої крутизни $(\rho_1 - \rho_2)$, що по обернено-квадратичній залежності зменшує дисперсію похибки пеленгування $\sigma_{\Delta\theta}^2$. Тому існує оптимальне співвідношення сигнальних відліків $L_1 / L_2 = m_L$, що забезпечує мінімум дисперсії похибки пеленгування $\sigma_{\Delta\theta}^2$. Визначимо це оптимальне співвідношення m_L .

Враховуючи, що $0 < L_2 < L_1$, введемо співвідношення:

$$L_2 = m_L \cdot L_1, \quad (5)$$

де m_L – коефіцієнт пропорційності, можливі значення якого лежать в межах $1 / L_1 \leq m_L \leq (L_1 - 1 / L_1)$.

Тоді рівняння (4) набуде вигляду:

$$\sigma_{\Delta\theta}^2 = \frac{K_m \cdot N_w \cdot K_\varphi \cdot K_w}{L_1 \cdot 2P_S \cdot d^3 \pi^2}, \quad (6)$$

де $K_m = \frac{(m_L + 1)}{m_L (1 - m_L)^2}$.

Визначимо екстремальне значення m_L і відповідно L_2 відносно L_1 , що забезпечує мінімум дисперсії $\sigma_{\Delta\theta}^2$ при незмінних інших параметрах. Для цього визначимо похідну дисперсії $\sigma_{\Delta\theta}^2$ по m_L та прирівняємо її до нуля:

$$\frac{d\sigma_{\Delta\theta}^2}{dm_L} = \frac{N_w \cdot K_\varphi \cdot K_w}{2P_S \cdot d^3 \pi^2} \left(\frac{m_L (1 - m_L) - (m_L + 1)(1 - 3m_L)}{m_L (1 - m_L)} \right) = 0. \quad (7)$$

Розв'язком рівняння (7) є значення $m_L = 0,281$ і відповідно екстремальне значення $L_2 = 0,281 \cdot L_1$, що забезпечує мінімум дисперсії похибки пеленгування $\sigma_{\Delta\theta}^2$. Таким чином, незалежно від виду вікна W_θ , кількості пеленгаційних каналів L_1 та інших факторів, рівняння (7) визначає оптимальне співвідношення параметрів першої та другої багатопелюсткової ДС.

Відповідно до рівняння (6) отримаємо залежність точності комплексного алгоритму пеленгування $K_m(m_L)$ від співвідношення сигнальних відліків m_L , що представлена на рис. 1.

Аналіз залежності на рис. 1 показує, що при оптимальному значенні $m_{L,opt}$ коефіцієнт K_m досягає мінімального значення, що дорівнює $K_{m,min} = 8,83$, і монотонно зростає при збільшенні чи зменшенні m_L , наближаючись до нескінченності на краях інтервалу $m_L \in (0;1)$ визначення.

Наприклад, для типового варіанта при кількості елементів АР $L = 32$, з формули (6), максимальне значення $m_L = 31 / 32 \approx 0,97$, що зумовлює відповідне значне збільшення коефіцієнта K_m та дисперсії похибки пеленгування $\sigma_{\Delta\theta}^2$ на 23 дБ. Таким чином коефіцієнт K_m суттєво впливає на точність пеленгування і його оптимізація має суттєве значення при забезпеченні високої точності пеленгування.

Діапазон значень m_L , що зумовлює зростання K_m і відповідно дисперсію похибки пеленгування $\sigma_{\Delta\theta}^2$ на 3 дБ лежить в межах $m_L \in (0,08; 0,57)$.

З урахуванням простоти технічної реалізації із вказаного діапазону доцільно вибирати значення $m_L = 0,5$.

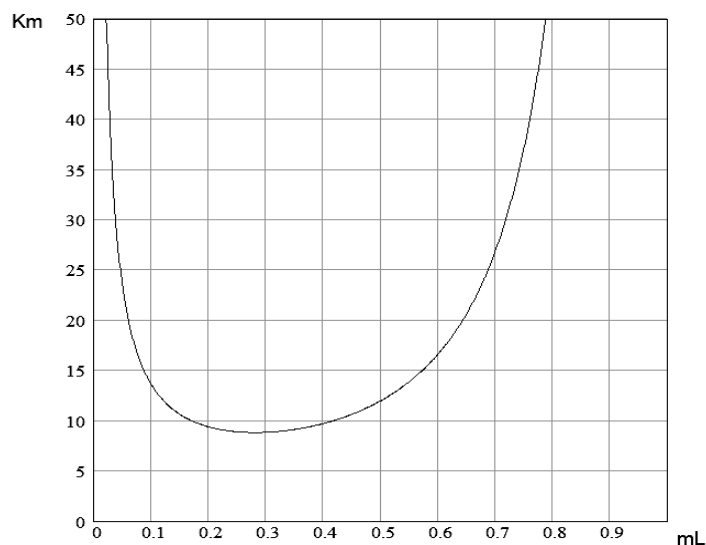


Рис. 1. Залежність точності комплексного алгоритму пеленгування від співвідношення сигнальних відліків m_L

Висновок. Розроблено оптимальний алгоритм комплексного спектрально-кореляційного пеленгування з використанням антенної решітки, що забезпечує мінімум дисперсії похибки пеленгування при обмежених часових та апаратних витратах. Визначено оптимальне співвідношення параметрів двох комплексних багатопелюсткових діаграм спрямованості пеленгатора та спосіб їх синтезу.

Результати досліджень показали, що регулювання пеленгаційних характеристик пелюсток багатопелюсткових ДС суттєво впливає на точність пеленгування, зумовлюючи її зміну в межах більше 20 дБ. Проведені дослідження дозволили оптимізувати ці характеристики і отримати їх оптимальне значення, що забезпечує мінімум дисперсії похибки пеленгування.

В подальшому доцільно виконати дослідження використання комплексного алгоритму пеленгування для умов пеленгування джерел широкопasmових радіовипромінювань сучасних радіоелектронних засобів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения / Д.Х. Джонсон. – ТИИЭР, 1982. – Т. 70. – № 9. – С. 126–139.
2. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа / В.В. Дрогалин, В.И. Меркулов, В.А. Радзивилов, И.В. Фёдоров, М.В. Чернов // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 2. – С. 3–17.
3. Зелкин Е.Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием / Е.Г. Зелкин, В.Г. Соколов. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с. : ил.
4. Шевченко В.Н. Двумерная цифровая обработка сигналов в антенных решетках методом коротких свёрток / В.Н. Шевченко // Антенны. – 2002. – № 12 (67). – С. 18–22.
5. Обработка сигналов в многоканальных РЛС / А.П. Лукошин, С.С. Каринский, А.А. Шаталов и др. ; под ред. А.П. Лукошина. – М.: Радио и связь, 1983. – 328 с.
6. Леонов А.И. Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов, К.И. Фомичёв. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1984, – 312 с. : ил.
7. Ципоренко В.В. Алгоритм швидкого комплексного пеленгування із використанням антенних решіток / В.В. Ципоренко // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2009. – № 2(49). – С. 53–58.
8. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. / Марпл мл. С.Л. – М.: Мир, 1990.
9. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения / Д.Х. Джонсон. – ТИИЭР, 1982. – Т. 70. – № 9. – С. 126–139.
10. Дрогалин В.В. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа / В.В. Дрогалин, В.И. Меркулов, В.А. Радзивилов, И.В. Фёдоров, М.В. Чернов // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 2. – С. 3–17.

11. *Леонов А.И.* Моноимпульсная радиолокация / *А.И. Леонов, К.И. Фомичёв.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1984. – 312 с. : ил.
12. Теоретические основы радиолокации : учебн. пособие для вузов / *А.А. Корстелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник и др.* ; под ред. В.Е. Дулевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Сов. радио, 1978. – 608 с.
13. Антенны и устройства СВЧ (проектирование фазированных антенных решеток) : уч. пособие для вузов / под ред. Д.И. Воскресенского. – М. : Радио и связь, 1981.

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

Наукові інтереси:

– пошук та пеленгування радіовипромінювань з використанням цифрових методів обробки.

Подано 10.12.2009

Ципоренко В.В. Оптимізація алгоритму комплексного спектрально-кореляційного пеленгування з використанням антенної решітки

Ципоренко В.В. Оптимизация алгоритма комплексного спектрально-корреляционного пеленгования с использованием антенной решетки

Tsiporenko V.V. Optimization of the algorithm of the complex spectral-correlation DF with use of antenna lattice

УДК 621.37:621.391

Оптимизация алгоритма комплексного спектрально-корреляционного пеленгования с использованием антенной решетки / В.В. Ципоренко

Разработан оптимальный алгоритм комплексного спектрально-корреляционного пеленгования с использованием антенной решетки, что обеспечивает минимум дисперсии погрешности пеленгования при ограниченных временных и аппаратурных затратах. Определено оптимальное соотношение двух комплексных многопетлевых диаграмм направленности пеленгатора и способ их синтеза.

УДК 621.37:621.391

Optimization of the algorithm of the complex spectral-correlation DF with use of antenna lattice / V.V. Tsiporenko

It is designed optimum algorithm of complex spectral-correlation DF with use of antenna lattice that provides the minimum of dispersions of inaccuracy of DF under limited time and equipment expenses. It is determined optimum correlation of two complex much petal diagrams of directivities of the direction finder and way of their syntheses.