

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТЕННИХ РЕШІТОК РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ДЛЯ КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ

Актуальність. Завадостійкість радіопеленгаторів суттєво залежить від параметрів їх антено-фідерних систем і конфігурації антенних решіток. Тому дослідження ефективності просторово-частотної селективності антенних решіток різної конфігурації є актуальною задачею.

Мета. Метою статті є дослідження впливу параметрів просторово-частотної селективності різних конфігурацій антенних решіток на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів.

Метод. В роботі виконано аналітичні дослідження та експериментальні дослідження залежності ефективності просторово-частотної селективності розглянутих конфігурацій антенних решіток від їх основних параметрів.

Результати. В роботі виконано дослідження використання можливих варіантів конфігурації та ефективності антенних решіток для кореляційно-інтерферометричного пеленгування. Визначені основні параметри антенних решіток, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів. Показано, що при покращенні параметрів селективності антенних решіток, таких як рівень бічних пелюсток, ширина головної пелюстки, коефіцієнт спрямованої дії і коефіцієнт шумової ширини головної пелюстки діаграми спрямованості та незмінній кількості радіоканалів, ефективність конфігурації антенної решітки радіопеленгатора буде збільшуватись. Запропоновано варіант оцінки ефективності просторово-частотної селективності конфігурацій антенних решіток, що кількісно враховує усі основні особливості реалізації їх просторового та часово-частотного тракту та визначає їх завадостійкість.

Висновки. Порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурацій антенних решіток показав, що при високому рівні завад суттєво кращу ефективність та перспективність застосування має система з двох ортогональних лінійних антенних решіток. Її ефективність на 20дБ більша порівняно з кільцевою антенною решіткою.

Ключові слова: ефективність антенних решіток; кореляційно-інтерферометричний метод; радіопеленгування; лінійна антена решітка.

НОМЕНКЛАТУРА

АР – антена решітка;
АФС – антенно-фідерна система;
ДС – діаграма спрямованості;
ДРВ – джерело радіовипромінювання;
ЕМО – електромагнітна обстановка.
 d – відстань між елементами (крок) АР;
 K_{SL} – рівень бічних пелюсток;
 K_D – коефіцієнт спрямованої дії;
 K_n – коефіцієнт шумової ширини головної пелюстки ДС;
 K_F – коефіцієнт фільтрації;
 K_{SW} – рівень бічних пелюсток вікна спектрального аналізу;
 K_W – коефіцієнт когерентного підсилення вікна спектрального аналізу;
 K_{nW} – коефіцієнт шумової ширини вікна спектрального аналізу;
 k – кількість екранованих лінійних АР;
 L – кількість радіовипромінювань в межах смуги Δf_k пропускання радіоканалів АР;
 m – кількість кутів конфігурацій АР;
 $n(t)$ – власний адитивний білий гаусів шум радіоканалів;
 N_Σ – кількість радіоканалів АР;
 P_S, P_Z, P_N – потужність сигналу, завад та шумів відповідно;

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

$S_Z(t)$ – прийняті радіовипромінювання завад;

t – змінна часу;

T_a – час аналізу суміші $U(t)$;

$U(t)$ – прийнята адитивна суміш радіовипромінювань;

$W(z)$ – вагова функція діаграмоутворення (вікна спектрального аналізу);

z – порядковий номер елементів АР;

γ_{A1} – ефективність просторової селективності кільцевої АР;

γ_{A2} – ефективність просторової селективності системи ортогональних лінійних АР;

γ_{A3} – ефективність просторової селективності багатокутної (3-х та 4-х кутної) екранованої системи;

γ_{A4} – ефективність просторової селективності для конфігурацій ортогональних екранованих систем з лінійних АР;

$\Delta\theta_{ML}$ – ширина головної пелюстки ДС;

$\Delta\theta_A$ – ширина робочого сектора пеленгування;

$\Delta\theta_{MW}$ – ширина головної пелюстки Фур'є-перетворення функції вікна спектрального аналізу;

Δf_k – ширина смуги пропускання радіоканалів АР;

θ_{ML} – напрямок головної пелюстки ДС АР відносно вісі АР;

$\hat{\theta}$ – оцінка напрямку на ДРВ;

λ – довжина хвилі сигналу;

μ – відношення сигнал/(шум+завади);

μ_A – відношення сигнал/(шум+завади) на виході АР радіопеленгатора.

ВСТУП

При стрімкому збільшенні кількості радіоелектронних засобів в різних галузях діяльності суспільства актуальною задачею є ефективний контроль використання радіочастотного ресурсу і забезпечення електромагнітної сумісності. В цих умовах основною задачею служб радіомоніторингу є контроль роботи ліцензованих ДРВ, а також оперативний пошук несанкціонованих ДРВ і усунення причин їх виникнення [1]. Виконання цієї задачі суттєво ускладнюється в умовах великих населених пунктів, де просторова щільність ДРВ може сягати величини 10^4 джерел на квадратний кілометр.

Основними засобами, що забезпечують ефективну просторову локалізацію джерел завад є радіопеленгатори. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для апаратури радіомоніторингу є цифрові кореляційно-інтерферометричні радіопеленгатори, що використовують АР.

Основною перевагою кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точність пеленгування джерел широкосмугових радіовипромінювань при невеликих (менше 0дБ) відношеннях сигнал/шум [1]. Це зумовлено наступними факторами: можливість використання ефективних алгоритмів оброблення сигналів в умовах апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань; можливість ефективної компенсації завад і спотворень, що зумовлені впливом сторонніх об'єктів і елементів АР. Також технологія кореляційно-інтерферометричного пеленгування дає можливість використання різноманітних конфігурацій АР, що дозволяє розширювати область однозначного пеленгування і збільшувати просторову розрізняльну здатність.

Завадостійкість радіопеленгаторів суттєво залежить від параметрів їх антено-фідерних систем і конфігурації АР [2]. Важливою проблемою розробки радіопеленгаторів є забезпечення їх завадостійкості, що, в свою чергу, дозволяє їм ефективно функціонувати в складній ЕМО при дії різноманітних завад.

Вказані переваги зумовлюють те, що на сьогодні розробка цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з АР є одним із перспективних напрямків розвитку засобів радіомоніторингу.

Таким чином, невирішеною раніше частиною загальної проблеми розробки і дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, є дослідження впливу параметрів просторової селективності та ефективності різних конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Відповідно до невирішеної раніше проблеми розробки і дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, метою статті є: дослідження впливу параметрів просторово-частотної селективності різних конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

– дослідження можливих варіантів конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів;

– визначення основних параметрів АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів;

– дослідження ефективності конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що визначає їх завадостійкість;

– порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурацій АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Результати досліджень по аналізу та синтезу конфігурації АР, а також впливу їх параметрів на завадостійкість та точність кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів представлені в великій кількості сучасних наукових праць.

В роботах [2, 3] наведені результати досліджень принципів побудови та завадостійкості швидкодіючих моноімпульсних цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що використовують лінійні АР. Показана можливість забезпечення пеленгування в реальному масштабі часу одночасно декількох ДРВ, спектри радіовипромінювань яких перекриваються за частотою. Така можливість реалізується на основі лінійних АР з цифровим діаграмоутворенням, що забезпечує низький рівень бічних пелюсток ДС, наприклад, не більше –60дБ. Однак в даних роботах не наведений порівняльний аналіз можливих конфігурацій АР і відповідного досягнення високої завадостійкості та швидкодії радіопеленгатора.

У роботах [4, 5] досліджені пошукові кореляційно-інтерферометричні методи оцінки напрямку на ДРВ з використанням АР, які ефективно реалізуються в цифровій формі. Ці методи використовують багатоітераційний компенсаційний алгоритм оцінки затримки прийому радіовипромінювання рознесеними в просторі пеленгаційними каналами. Це обумовлює низьку швидкодію пеленгування.

В роботі [6] запропоновано безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу, що має високу точність і завадостійкість за рахунок використання попередньої просторової селекції та дисперсійно-кореляційної оцінки напрямків на ДРВ. Даний метод пеленгування використовує оцінку просторової частоти сигналу по двом реконструйованим відлікам просторового аналітичного сигналу. Це залишає можливість подальшого його вдосконалення з метою мінімізації обчислювальних витрат і підвищення швидкодії пеленгування. Також дослідження завадостійкості даного методу не проведено.

У роботах [7–9] досліджені нелінійні спектральні методи пеленгування, які забезпечують високу просторову роздільну здатність прийнятих випромінювань. Однак вони мають ряд суттєвих для систем радіомоніторингу недоліків, таких як висока обчислювальна складність (час обробки сигналів), що в кілька разів перевищує складність пошукового кореляційного методу пеленгування; не-

обхідність точної апіорної інформації про кількість прийнятих в суміші випромінювань; зміщеність оцінок напрямків, що погіршує точність пеленгування; втрата стійкості роботи при низьких (близько 10дБ) вхідних відношеннях сигнал/шум. В результаті ефективність застосування спектральних методів пеленгування, що визначається, в першу чергу, відношенням швидкодія/точність пеленгування, в системах радіомоніторингу недостатня. Це підтверджується відсутністю їх використання в сучасних цифрових пеленгаторах систем радіомоніторингу [1].

В роботах [10–12] наведені результати синтезу основних варіантів побудови спрямованих і неспрямованих антенних систем сучасних радіопеленгаторів. Проведені дослідження їх основних параметрів і характеристик. Визначено, що для задач пеленгування доцільно використовувати фазовані АР із кільцевою та лінійною конфігураціями. Такі АР зазвичай реалізуються в одній або декількох площинах і забезпечують якісну просторову селективність. Застосування АР забезпечує можливість швидкого просторового сканування в широкому робочому секторі і можливість ефективного подавлення та пеленгування завад.

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

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Нехай здійснюється прийом АР в межах смуги пропускання радіоканалів радіопеленгатора адитивної суміші $U(t)$ взаємно некорельованих сигналу $S(t)$ та радіовипромінювань $S_Z(t)$ завад при наявності шуму $n(t)$:

$$U(t) = S(t) + S_Z(t) + n(t). \quad (1)$$

Будемо вважати відомими значення середніх потужностей P_S сигналу $S(t)$, P_Z завад $S_Z(t)$, та P_N шумів $n(t)$.

Для вказаних умов виконаємо дослідження впливу параметрів просторової селективності різних конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

АФС радіопеленгаторів в умовах складної ЕМО виконує дві основні функції: функціонального кутового дискримінатора і просторового селектуючого елемента [1]. Просторові селектуючі властивості АФС, що реалізуються на основі АР, визначаються формою та параметрами її ДС, такими як $\Delta\theta_{ML}$, K_{SL} , K_D .

Складність ЕМО та умови функціонування радіопеленгатора кількісно доцільно характеризувати кількістю L радіовипромінювань та відношенням μ в межах смуги Δf_k :

$$\mu = \frac{P_S}{P_Z + P_N}. \quad (2)$$

На виході АР радіопеленгатора відношення μ_A покращується за умови, що напрямки на ДРВ завади знаходяться за межами головної пелюстки ДС АР і визначається наступним чином:

$$\mu_A = \frac{P_S \cdot K_D^2}{P_Z \cdot K_{SL}^2 + P_N \cdot (\Delta\theta_{ML} / 2\pi) \cdot K_n}. \quad (3)$$

Аналіз рівнянь (1)–(3) показує, що відношення μ_A на виході АР і відповідна завадостійкість радіопеленгатора в цілому суттєво залежить від ширини $\Delta\theta_{ML}$ і рівня K_{SL} , які в свою чергу визначаються кількістю N_Σ і способом утворення ДС [13, 14].

В результаті оцінку ефективності γ_A просторової селективності АР радіопеленгатора доцільно визначити як відношення покращення μ_A / μ на її виході до кількості N_Σ , що визначає об'єм її апаратних витрат, наступним чином:

$$\gamma_A = \frac{\mu_A}{\mu \cdot N_\Sigma} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_D^2}{N_\Sigma (K_{SL}^2 + (P_N / P_Z) \cdot (\Delta\theta_{ML} / 2\pi) \cdot K_n)}. \quad (4)$$

Аналіз рівняння (4) показує, що оцінка ефективності γ_A кількісно враховує усі особливості реалізації тільки просторового тракту радіопеленгатора, тобто є інтегрованою оцінкою його просторових селектуючих властивостей. Однак недоліком такого варіанта оцінки ефективності γ_A є відсутність врахування особливостей реалізації часово-частотного тракту радіопеленгатора, що визначається алгоритмом оброблення прийнятої суміші $U(t)$ після АР. В цілому просторовий та часово-частотний тракт кореляційних радіопеленгаторів забезпечує максимально правдоподібну оцінку $\hat{\theta}$ і еквівалентний низькочастотному фільтру з коефіцієнтом K_F , що пропорційний часу T_d .

З урахуванням статистичної незалежності сигналу $S(t)$, радіовипромінювань $S_Z(t)$ завад та шуму $n(t)$ етапи просторового та часово-частотного оброблення можуть виконуватись в довільному порядку. З урахуванням цього ефективність просторово-частотної селективності γ_A в (4) доцільно представити наступним чином:

$$\gamma_A = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_D^2}{N_\Sigma (K_{SL}^2 + (P_N / P_Z) \cdot (\Delta\theta_{ML} / 2\pi \cdot K_F) \cdot K_n)}. \quad (5)$$

Особливістю оцінок ефективності γ_A згідно (4) та (5) є їх залежність від відношення q .

При переважанні в суміші $U(t)$ потужних станційних завад $S_Z(t)$ відношення q буде зменшуватись і ефективність γ_A буде визначатися якістю придушення завад за межами сектора $\Delta\theta_{ML}$ головної пелюстки, тобто рівнем K_{SL} бічних пелюсток ДС.

При переважанні в суміші $U(t)$ шумів $n(t)$, що рівномірно розподілені у просторі, ефективність γ_A буде в основному визначатися відносною шириною $(\Delta\theta_{ML} / 2\pi)$ головної пелюстки ДС і відповідними апаратними витратами N_Σ .

Перевагою запропонованого в (5) варіанта оцінки ефективності γ_A є його висока інформативність при простоті розрахунку. Аналіз рівняння (5) показує, що при покращенні параметрів селективності АР, таких як рівень K_{SL} , ширина $\Delta\theta_{ML}$, коефіцієнт K_D і коефіцієнт K_n , та незмінній кількості N_Σ радіоканалів АР ефективність γ_A буде збільшуватись.

Виконаємо дослідження залежності ефективності γ_A від її топології. Для цього визначимо конфігурацію AP, як спосіб розташування у просторі її N_Σ елементів [15]. Для подальшого аналізу доцільно виділити наступні основні варіанти конфігурації AP, що мають найбільш широке застосування в кореляційно-інтерферометричних методах радіопеленгування: кільцева AP, система з двох ортогональних лінійних AP (хрестоподібна), багатокутна з екрануванням, система з двох ортогональних лінійних AP з екрануванням [14]. Графічне зображення вказаних конфігурацій AP наведені на рис. 1.

На рис. 1 крапками позначені просторові позиції елементів AP, суцільними лініями позначені елементи екранування.

Визначимо значення ефективності γ_{A1} , рис. 1а. Основною перевагою кільцевих AP є незалежність їх просторової селективності від напрямку θ_{ML} в межах $(0;2\pi)$ радіан робочого сектору пеленгування при відносно невеликих габаритах [1].

Основним недоліком кільцевих AP є відносно великий рівень бічних пелюсток ДС, що зумовлює низьку завадозахищеність за відношенням сигнал/завада радіопеленгатора. Визначимо значення параметрів селективності кільцевої AP наступним чином [1]:

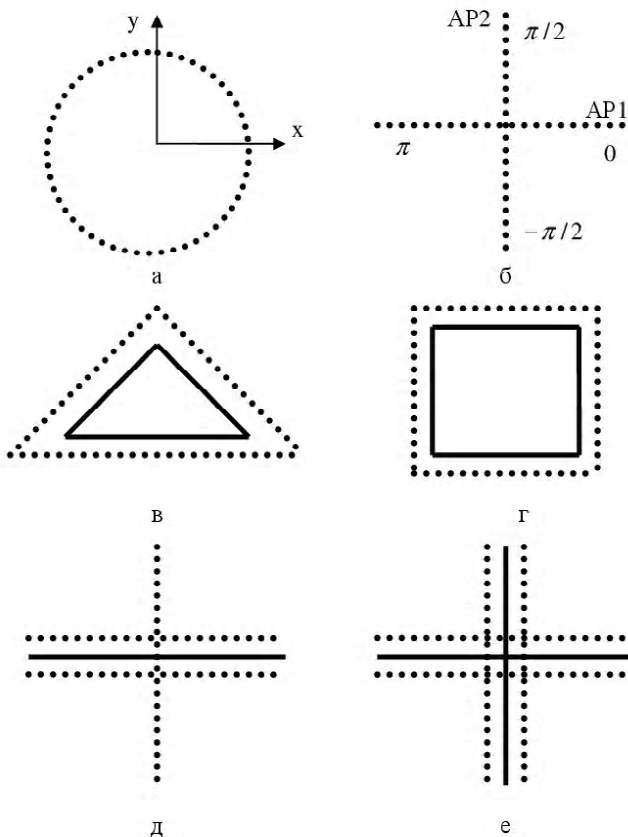


Рисунок 1 – Основні варіанти конфігурації AP кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів:
а – кільцева; б – система з двох ортогональних лінійних AP;
в – трикутна з екрануванням; г – чотирикутна з екрануванням;
д – система з двох ортогональних лінійних AP з частковим екрануванням; е – система з двох ортогональних лінійних AP з повним екрануванням

$$\Delta\theta_{ML1} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{2,43 \cdot \lambda}{N_\Sigma \cdot d}\right);$$

$$d \leq \lambda/2;$$

$$K_{SL1} \in [0,1;0,4] = [-20\text{dB};-8\text{dB}];$$

$$K_{D1} = 1;$$

$$K_{n1} = [1;1,2].$$

З урахуванням (4) і (5) визначимо ефективність γ_{A1} за умови $N_\Sigma \gg 1$:

$$\gamma_{A1} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_D^2}{N_\Sigma \left(K_{SL1}^2 + K_{n1} \cdot \left(2 \cdot \arcsin\left(\frac{2,43 \cdot \lambda}{N_\Sigma \cdot d} \right) / 2\pi \cdot K_F \right) \right)}. \quad (7)$$

Аналіз рівнянь (6) та (7) показав, що селективність за шумами та ефективність γ_{A1} в цілому збільшується пропорційно кількості N_Σ радіоканалів AP і її габаритів ($N_\Sigma \cdot d / 2\pi$). При цьому просторова селективність за завадами, що визначається рівнем K_{SL} бічних пелюсток ДС AP, низька (максимум -10dB), і за умови $d \leq \lambda/2$ не залежить від величини кроку d AP та кількості N_Σ радіоканалів.

Виконаємо аналіз ефективності селективності конфігурації системи AP, яка складається із двох ортогональних лінійних AP, рис. 1б. Параметри селективності системи ортогональних лінійних AP визначимо наступним чином [14, 15]:

$$\Delta\theta_{ML2} = \Delta\theta_{MW} = \frac{2\lambda}{d \cdot 0,5N_\Sigma \cdot \sin\theta_{ML}};$$

$$K_{SL2} = K_{SW} \in [10^{-2};10^{-5}] = [-40\text{dB};-100\text{dB}];$$

$$K_{D2} = K_W / 2;$$

$$K_{n2} = K_{nW} \in [1;1,8]. \quad (8)$$

$K_{SL2} = K_{SW}$, $K_{D2} = K_W$, $K_{n2} = K_{nW}$ – коефіцієнти рівня бічних пелюсток, спрямованої дії, шумової ширини головної пелюстки, відповідно, що визначаються видом вагової функції $W(z)$ діаграмоутворення (вікна спектрального аналізу);

Аналіз рівнянь (8) показує, що коефіцієнти K_{SL2} , K_{D2} , K_{n2} визначаються видом вагової функції $W(z)$, тобто селективність системи ортогональних лінійних AP суттєво залежить від кількості N_Σ її радіоканалів, виду вагової функції $W(z)$ і ширини $\Delta\theta_A$. При пеленгуванні ДРВ в широкому робочому секторі ($\theta_{ML} \in [45;135]^\circ$ для кожної AP) обернено пропорційно множнику $\sin\theta_{ML}$ змінюється (максимум на 30%) ширина $\Delta\theta_{ML2}$ головної пелюстки ДС AP.

Для системи ортогональних лінійних AP весь робочий сектор $\Delta\theta_A$ можна розділити на чотири підсектори шириною $\Delta\theta_A / 4 = 0,5\pi$ радіан, які попарно відповіда-

ють першій та другій ортогональним лінійним АР пеленгатора наступним чином: для першої АР $\Delta\theta_{A1} \in [-\pi/4; \pi/4] \vee [3\pi/4; -3\pi/4]$, для другої АР $\Delta\theta_{A2} \in (\pi/4; 3\pi/4) \vee (-3\pi/4; -\pi/4)$.

З урахуванням цього максимальне відхилення головної пелюстки для кожної зі складових першої та другої ортогональних лінійних АР буде становити:

$$\max\{\theta_{ML}\} = \theta_{ML.\max} = \pi/4. \quad (9)$$

З урахуванням (8) та (9) оцінимо значення ефективності γ_{A2} системи ортогональних лінійних АР наступним чином:

$$\gamma_{A2} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_W^2 / 4}{N_\Sigma \left(K_{SW}^2 + \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_{nW} \cdot 4 \cdot \lambda}{d \cdot N_\Sigma \cdot \sin(\theta_{ML})} \cdot 2\pi \cdot K_F \right)}. \quad (10)$$

Аналіз (9) та (10) показав, що просторова селективність системи ортогональних лінійних АР, рис. 1б, може легко регулюватися в широких межах шляхом вибору функції $W(z)$ і кількості N_Σ радіоканалів.

Суттєвим недоліком системи ортогональних лінійних АР є наявність в її ДС побічних головних пелюсток θ_{ML2} з напрямками просторових каналів $\theta_Z = \{-\theta_{ML2}, (\pi - \theta_{ML2}), (\theta_{ML2} - \pi)\}$, рівень яких дорівнює коефіцієнту K_D головної пелюстки. Частково цей недолік може бути усунений завдяки просторовій селекції одночасно діючих першої та другої ортогональних лінійних АР при обмеженій кількості $m_Z \leq 3$ одночасно діючих завад по побічним головним пелюсткам. Також треба враховувати, що при рівномірному розподілі густини імовірності $P_{Z0} = 1/2\pi$ ДРВ завад в межах робочого сектора $\Delta\theta_A = 2\pi$ імовірність враження радіопеленгатора по чотирьом побічним просторовим каналам θ_Z прийому буде незначною і має порядок 10^{-6} .

Вказаний недолік системи ортогональних лінійних АР усувається шляхом використання додаткового екранування АР або використання складних адаптивних алгоритмів компенсації завад [15, 16]. Першому варіанту ортогональних лінійних АР з екрануванням відповідають лінійні АР з опуклою конфігурацією у вигляді багатокутників, що містять внутрішні екрануючі системи, рис. 1в, рис. 1г, або подвосенні ортогональні лінійні АР з екраном між кожною парою АР, рис. 1д, рис. 1е. Недоліком топологій системи лінійних АР з екрануванням є додаткові апаратурні витрати зі збільшенням кількості N_Σ радіоканалів, а також складність реалізації.

Визначимо основні параметри просторової селективності багатокутної системи лінійних АР з екрануванням. В загальному випадку для m -кутної конфігурації:

$$\begin{aligned} \max\{\Delta\theta_{ML3}\} &= \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot 2\lambda}{d \cdot (N_\Sigma / 2m) \cdot \sin \theta_{ML.\max}} = \\ &= \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot 4m \cdot \lambda}{d \cdot N_\Sigma \cdot \sin \theta_{ML3.\max}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{D3} &= K_W / m; \\ K_{n3} &= K_{nW} = \in [1; 1,8]; \\ K_{SL3} &= K_{SW} = \in [10^{-2}; 10^{-5}]; \\ \theta_{ML3.\max} &= (2\pi / m) / 2 = \pi / m. \end{aligned} \quad (11)$$

З урахуванням (4) і (11) для умови $N_\Sigma \gg 1$ визначимо ефективність просторової селективності багатокутної екранованої системи, рис. 1в, рис. 1г, з лінійних АР наступним чином:

$$\gamma_{A3} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot (K_W / m)^2}{N_\Sigma \left(K_{SW}^2 + \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot 4m \cdot \lambda \cdot K_{nW}}{d \cdot N_\Sigma \cdot \sin(\pi / m) \cdot 2\pi \cdot K_F} \right)}. \quad (12)$$

Аналогічним чином визначимо параметри селективності $\Delta\theta_{ML}, K_D, K_n, K_{SL}, \theta_{ML.\max}$:

$$\begin{aligned} \max\{\Delta\theta_{ML4}\} &= \max\{\Delta\theta_{ML5}\} = \frac{2\lambda}{d \cdot (N_\Sigma / (2+k)) \cdot \sin \theta_{ML}}; \\ K_{D4} &= K_{D5} = K_W / (2+k); \\ K_{n4} &= K_{n5} = K_{nW} = \in [1; 1,8]; \\ K_{SL4} &= K_{SL5} = K_{SW} = \in [10^{-2}; 10^{-5}]; \\ \theta_{ML4.\max} &= \theta_{ML5.\max} = \pi / 4. \end{aligned} \quad (13)$$

З урахуванням (4) та (13) ефективність γ_{A4} просторової селективності для конфігурацій ортогональних екранованих систем з лінійних АР, рис. 1д, рис. 1е:

$$\gamma_{A4} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_W^2 / (2+k)^2}{N_\Sigma \left(K_{SW}^2 + \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot 2(2+k) \cdot \lambda \cdot K_{nW}}{d \cdot N_\Sigma \cdot \sin(\pi / 4) \cdot 2\pi \cdot K_F} \right)}. \quad (14)$$

Порівняльний аналіз рівнянь (10) та (14) показує, що додаткова селекція дзеркальних просторових каналів прийому в системі ортогональних лінійних АР досягається відносно невеликим (на [30–50]%) збільшенням кількості N_Σ радіоканалів при незмінному значенні $\theta_{ML.\max} = \pi/4$ радіан максимального відхилення напрямку головної пелюстки від нормалі. В екранованих ортогональних лінійних АР селективність за дзеркальними просторовими каналами прийому може бути збільшена до (–60dB) при відсутності розширення $\Delta\theta_{ML}$.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Виконаємо з використанням програми MathCad та рівнянь (7), (10), (12) та (14) експериментальні дослідження залежності ефективності γ_A розглянутих конфігурацій АР від кількості N_Σ радіоканалів АР при ЕМО різної складності – при $P_Z / P_N = 0$ дБ та $P_Z / P_N = 20$ дБ.

Моделювання виконаємо за наступних умов: для кільцевої АР γ_{A1} : $K_{SL1} = 0,4$, $K_{D1} = 1$, $K_{n1} = 1,2$; для оцінки ефективності γ_{A2} , γ_{A3} , γ_{A4} врахуємо використання функції $W(z)$ діаграмоутворення – Хемінга з параметрами: коефіцієнт спрямованої дії $K_W = 0,54$, коефіцієнт

шумової ширини головної пелюстки $K_{nW} = 1,36$, коефіцієнт рівня бічних пелюсток $K_{SW} = -43\text{дБ}$ [17]. Також оберемо коефіцієнт фільтрації корелятора рівним $K_F = 4 \cdot 10^4$, що відповідає умові оброблення $4 \cdot 10^4$ часових сигнальних відліків. Режим роботи АР – прийом під нахилом (з межовим напрямком прийому головної пелюстки) з кутом $\theta_{ML} = \pi/4$ для ортогональних систем та $\pi/3$ для трикутної конфігурації.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 2 та рис. 3 наведені залежності ефективностей: γ_{A1} для рис. 1а, γ_{A2} для рис. 1б, γ_{A3} для рис. 1в, γ_{A4}

для рис. 1е за умови мінімальних апаратних витрат, тобто при $m = 3$ для m -кутної конфігурації, рис. 1в, та $k = 2$ для конфігурації ортогональних екранованих систем з лінійних АР, рис. 1е.

Порівняльний аналіз залежностей ефективностей $\gamma_{A1} - \gamma_{A4}$ від кількості N_Σ радіоканалів на рис. 2 та рис. 3 показує, що ефективність АР незалежно від конфігурації є монотонною спадаючою функцією в залежності від кількості N_Σ радіоканалів. Залежності ефективностей $\gamma_{A1} - \gamma_{A4}$ є нелінійними.

Доцільно виділити два піддіапазони графіків. В піддіапазоні $N_\Sigma \in [4; 30]$ крутизна залежностей суттєва і зумов-

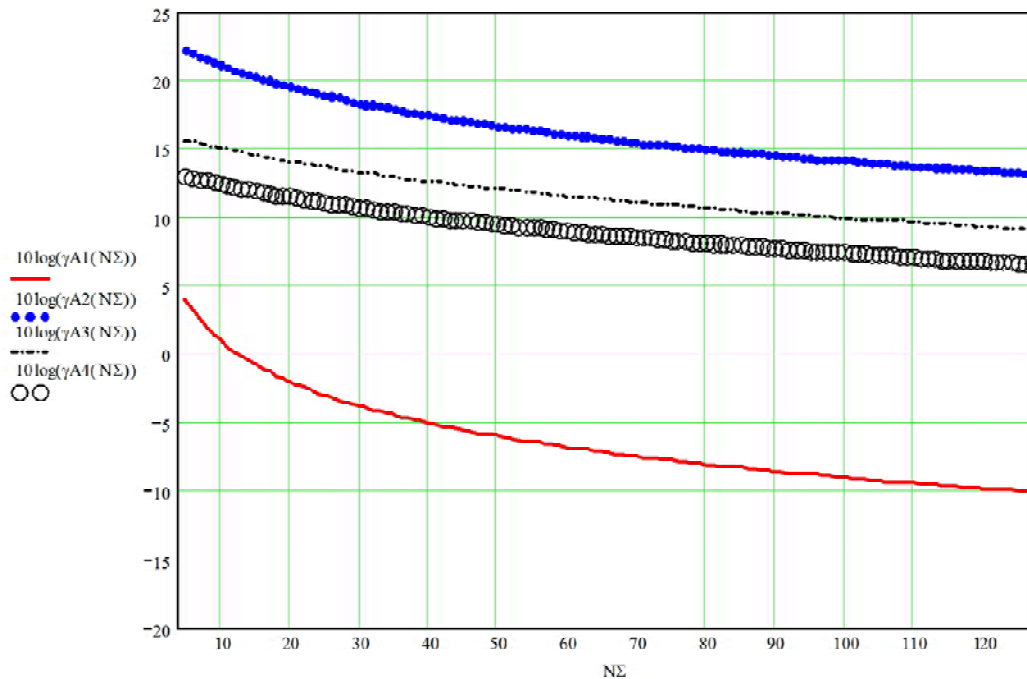


Рисунок 2 – Сімейство залежностей ефективності γ_A при $P_Z / P_N = 0\text{дБ}$ від кількості N_Σ радіоканалів

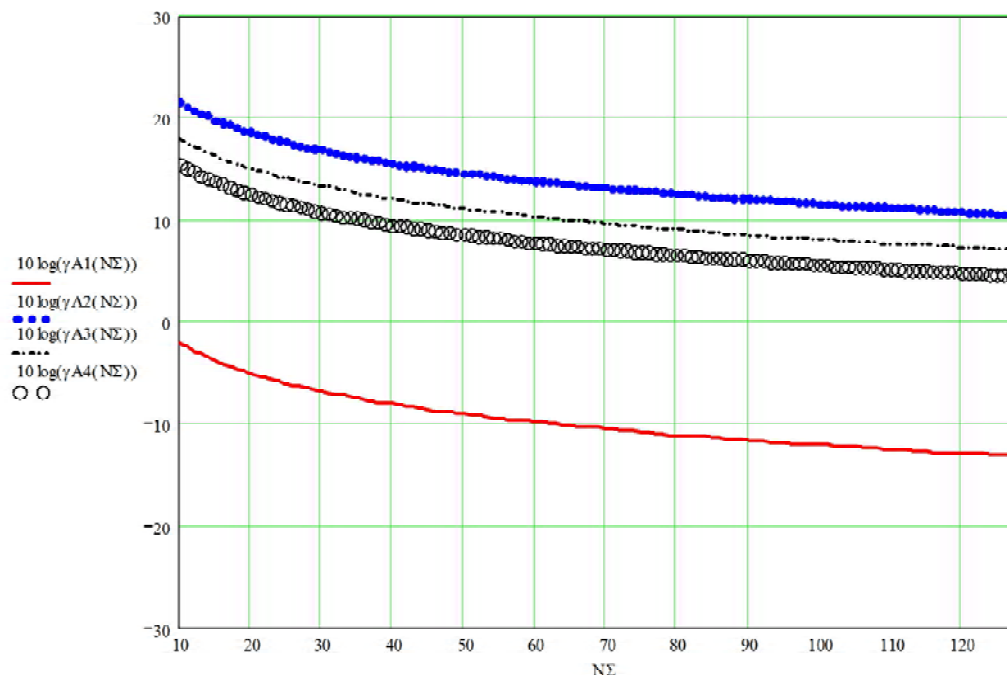


Рисунок 3 – Сімейство залежностей ефективності γ_A селективності конфігурацій АР при $P_Z / P_N = 20\text{дБ}$ від кількості N_Σ радіоканалів

лює зменшення ефективності в межах [3;7]дБ. В піддіапазоні $N_{\Sigma} > 30$ крутизна залежностей набагато менша.

Найкращу ефективність для двох варіантів ЕМО, при $P_Z / P_N = 0$ дБ та $P_Z / P_N = 20$ дБ має система з двох ортогональних лінійних АР, рис. 16. Її ефективність γ_{A2} просторової селективності краща порівняно з ефективністю γ_{A1} кільцевої АР на [20;25]дБ.

На рис. 4 наведені залежності ефективностей γ_A конфігурацій АР при $P_Z / P_N = 20$ дБ від коефіцієнта K_F фільтрації. Для отримання залежності рис. 4 оберемо $N_{\Sigma} = 32$.

При погіршенні ЕМО і зростанні відношення P_Z / P_N на 20дБ абсолютні значення ефективностей γ_{A2} , γ_{A3} та γ_{A4} збільшуються в середньому на 2дБ, а ефективність γ_{A1} кільцевої АР зменшується на 3дБ.

В результаті для умов складної ЕМО при $P_Z / P_N = 20$ дБ і більше доцільним є застосування ортогональної лінійної АР, рис. 16, а застосування кільцевої АР є малоефективним.

При застосуванні екранування, що захищає радіопеленгатор від дії множинних завад, найбільшу ефективність забезпечує трикутна АР з екрануванням, рис. 1в.

Аналіз рис. 4 показує, що ефективність просторової селективності конфігурацій АР за запропонованим критерієм суттєво залежить від коефіцієнта K_F . Залежності на рис. 4 ефективності γ_A від коефіцієнта K_F є немонотонно зростаючими, крутизна яких найбільша в діапазоні $K_F \in [10;1000]$. При цьому ефективність просторо-

вої селективності кільцевої АР практично не залежить від коефіцієнта K_F .

Врахування коефіцієнта K_F , що зазвичай більший $K_F > 10^3$, якісно не змінює співвідношення залежностей порівняно з рис. 2 та рис. 3, але значно підвищує інформативність критерія (5).

В цілому результати досліджень рис. 2–рис. 4 підтверджують інформативність та об'єктивність запропонованого критерія ефективності селективності конфігурації АР і підтверджують в складній ЕМО суттєво кращу ефективність та перспективність застосування конфігурацій з лінійних АР.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Результати розробки та дослідження критерія ефективності селективності АР різної конфігурації для кореляційно-інтерферометричного пеленгування підтверджують інформативність запропонованого критерія ефективності. Проведені дослідження ефективності варіантів одновимірних АР показали, що для умов складної ЕМО при високому рівні завад суттєво кращу ефективність просторової селективності, на [20;25]дБ більшу порівняно з кільцевою АР, та перспективність застосування мають конфігурації з лінійних ортогональних АР.

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

Обмеженнями на використання лінійних АР є їх великі габарити на частотах нижче 500МГц, а також лінійна пропорційна залежність точності і роздільної здатності пеленгатора від частоти сигналу.

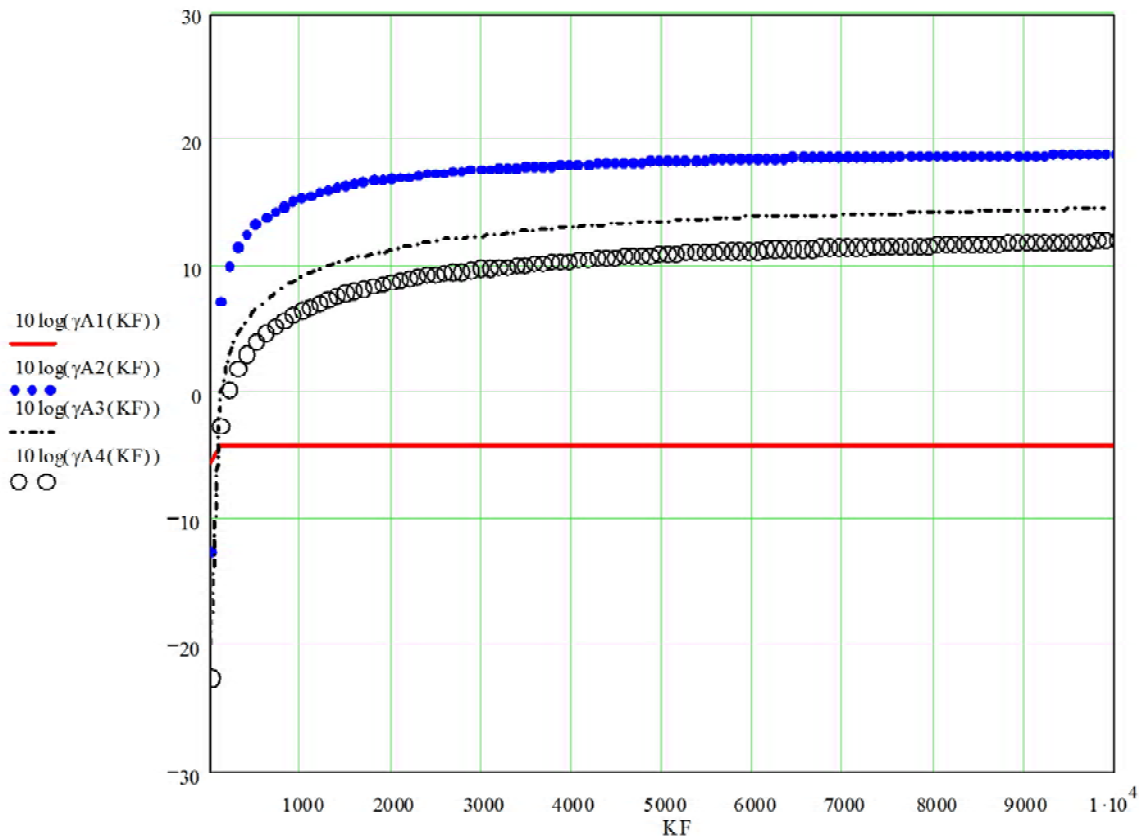


Рисунок 4 – Семейство залежностей ефективності γ_A при $P_Z / P_N = 20$ дБ від коефіцієнта K_F фільтрації

Дані дослідження є продовженням роботи по розробці цифрових кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів.

В подальшому необхідно провести дослідження ефективності селективності АР з використанням імовірнісних характеристик ЕМО, а також складних варіантів конфігурацій, в тому числі адаптивних АР.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження можливих варіантів конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів показують інформативність та інтегрований характер запропонованого показника ефективності γ_A просторово-частотної селективності конфігурацій антенних решіток.

Визначені основні параметри АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів. Показано, що при покращенні параметрів селективності АР, таких як рівень бічних пелюсток K_{SL} , ширина головної пелюстки $\Delta\theta_{ML}$, коефіцієнт спрямованої дії K_D і коефіцієнт K_n шумової ширини головної пелюстки діаграми спрямованості, та незмінній кількості N_Σ радіоканалів АР ефективність γ_A буде збільшуватись.

Запропоновано варіант оцінки ефективності γ_A просторово-частотної селективності різних конфігурацій АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що кількісно враховує усі особливості реалізації їх просторового та часово-частотного тракту та визначає їх завадостійкість.

Порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурацій АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів показав, що для умов складної ЕМО при високому рівні завад суттєво кращу ефективність просторово-частотної селективності, на [20;25]дБ більшу порівняно з кільцевою АР, та перспективність застосування мають конфігурації з двох ортогональних лінійних АР.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Jianfeng L. Joint direction finding and array calibration method for MIMO radar with unknown gain phase errors / L. Jianfeng, J. Ding, J. Defu // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2016. – Vol. 10, № 14. – P. 1563–1569. DOI: 10.1049/iet-map.2016.0104
3. Ципоренко В. В. Дослідження завадостійкості безпошукового цифрового спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з антенною решіткою шляхом моделювання / В. В. Ципоренко, В. Г. Ципоренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер. Технічні науки. – 2012. – № 3 (62). – С. 82–90.
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. Ципоренко В. В. Безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу / В. В. Ципоренко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратуробудування. – 2012. – № 48. – С. 75–84.
7. Kaluri V. R. Gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum / V. R. Kaluri, V. Shridhar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 4. – P. 2263–2268. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893
8. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements / [W. Chen, X. Xu, S. Wen, Z. Cao] // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2011. – Vol. 5, № 8. – P. 824–834. DOI: 10.1049/iet-rsn.2010.0289
9. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT / [F. Xiao, N. D. Sidiropoulos, M. Wing-Kin, J. Tranter] // Acoustics, Speech and Signal Processing : 2014 IEEE International Conference ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014 : proceedings. – Pisa : Marco Luise, 2014. – P. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108
10. Demonstration of an Electrically Small Antenna Array for UHF Direction-of-Arrival Estimation / [J. S. Matthew, D. C. Schmitz, D. M. Anderson, L. J. Douglas, T. B. Jennifer] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 3. – P. 1371–1377. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227921
11. 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
12. Jung-Hoon L. Method for Obtaining Three- and Four-Element Array Spacing for Interferometer Direction-Finding System / L. Jung-Hoon, L. Jong-Hwan, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2016. – Vol. 15. – P. 897–900. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2479224
13. Chandran S. Advances: Direction-of-Arrival Estimation / S. Chandran. – Norwood : ARTECH HOUSE, 2006. – 474 p.
14. Milligan T. A. Modern antenna design: second edition / T. A. Milligan. – New Jersey: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2005. – 614 p.
15. Lawrence M. J. Digital Spectral Analysis: With Applications / M. J. Lawrence. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1986. – 492 p.
16. Antenna engineering handbook / Ed. By J. L. Volakis. – New York : Digital Engineering Library. Mc Graw-Hill Companies, 2007. – 1755 p.
17. Proakis J. G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, 4th Edition / J. G. Proakis, D. G. Manolakis. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006. – 1077 p.

Стаття надійшла до редакції 03.01.2016.

Після доробки 20.02.2017.

Ципоренко В. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК РАЗНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ

Актуальность. Помехоустойчивость радиопеленгаторов существенно зависит от параметров их антенно-фидерных систем и конфигурации антенных решеток. Поэтому исследование эффективности пространственно-частотной селективности антенных решеток различной конфигурации является актуальной задачей.

Цель. Целью статьи является исследование влияния параметров пространственно-частотной селективности различных конфигураций антенных решеток на помехоустойчивость корреляционно-интерферометрических пеленгаторов.

Метод. В работе выполнены аналитические и экспериментальные исследования зависимости эффективности пространственно-частотной селективности рассмотренных конфигураций антенных решеток от их основных параметров.

Результати. В работе выполнены исследования использования возможных вариантов конфигурации и эффективности антенных решеток для корреляционно-интерферометрического пеленгования. Определены основные параметры антенных решеток, влияющие на помехоустойчивость корреляционно-интерферометрических пеленгаторов. Показано, что при улучшении параметров селективности антенных решеток, таких как уровень боковых лепестков, ширина главного лепестка, коэффициент направленного действия и коэффициент шумовой ширины главного лепестка диаграммы направленности, и неизменном количестве радиоканалов эффективность конфигурации антенной решетки радиопеленгатора будет увеличиваться. Предложен вариант оценки эффективности пространственно-частотной селективности конфигураций антенных решеток, который количественно учитывает все основные особенности реализации их пространственного и временно-частотного тракта и определяет их помехоустойчивость.

Выводы. Сравнительный анализ эффективности возможных конфигураций антенных решеток показал, что при высоком уровне помех существенно лучшую эффективность, на 20дБ большую по сравнению с кольцевой антенной решеткой, и перспективность применения имеют конфигурации из линейных антенных решеток.

Ключевые слова: эффективность антенных решеток, корреляционно-интерферометрический метод, радиопеленгование, линейная антенная решетка.

Tsyurenko V. V.

PhD, Associate professor, Associate professor of department of radio engineering, radioelectronic devices and telecommunication systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

RESEARCH OF EFFICIENCY OF ANTENNA ARRAYS OF DIFFERENT CONFIGURATIONS FOR CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC OF DIRECTION FINDING

Context. The immunity of radio direction finders depends greatly on the parameters of their antenna-feeder systems and on the configurations of antenna arrays. Thus, the study of the effectiveness of the spatial-frequency selectivity of antenna arrays of various configurations is an urgent task.

Objective. The aim of the article is to study the influence of parameters of the spatial-frequency selectivity of different configurations of antenna arrays on the noise immunity of correlation-interferometric direction finding.

Method. The analytical and the experimental researches of the efficiency dependence of the spatial-frequency selectivity of the considered configurations of antenna arrays of their basic parameters were completed.

Results. In the work the use of different kinds of configuration and efficiency of antenna arrays for correlative-interferometric direction finding was explored. The basic parameters of antenna arrays that affect the noise immunity of correlative-interferometric direction finders were determined. It is shown that with the improvement of selective parameters of antenna arrays, such as the level of minor lobes, the width of the main lobe, the coefficient of directional noise ratio and the coefficient of the noise width of the main lobe of the radiation pattern and with the constant number of radio channels the efficiency of configuration of antenna array of the direction finder will increase. The variant of estimation of effectiveness of spatial-frequency selectivity of configurations of antenna arrays was suggested, that counts quantitatively all main peculiarities of realization of their spatial and time-frequency path and determines their noise immunity.

Conclusions. The comparative analysis of the effectiveness of possible configurations of antenna arrays showed that the configuration of the orthogonal linear antenna arrays has the significantly better performance and the perspective of use, which is 20dB bigger, comparing with a circular antenna array.

Keywords: efficiency of antenna arrays, correlative-interferometric method of direction finding, linear antenna array.

REFERENCES

- Rembovskiy A. M., Ashychmin A. V., Kozmin V. A. ; pod red. A. M. Rembovskogo Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva 2-ye izd., pererab. i dop. Moscow, Goriaczaya liniya. Telekom, 2010, 624 p.
- Jianfeng L., Ding J., Defu J. Joint direction finding and array calibration method for MIMO radar with unknown gain phase errors, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, Vol. 10, No. 14, pp. 1563–1569. DOI: 10.1049/iet-map.2016.0104
- Tsyurenko V. V., Tsyurenko V. G. Doslidzhennia zavodostiystosti bezposhukovogo tsyfrovogo spektralnogo koreliatsiyno-interferometrychnogo radiopelengatora z antennoyu reshitkoyu shliachom modeliuвання, *Visnyk Zhytomyrskogo derzhavnogo technologichnogo universytetu. Ser. Technichni nauky*, 2012, No. 3 (62), pp. 82–90.
- 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
- 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
- Tsyurenko V. V. Bezposhukovyy tsyfrovyy metod koreliatsiyno-interferometrychnogo pelenguvannya z rekonstruyuvannim prostorovogo analitychnogo sygnalu, *Visnyk Natsionalnogo technichnogo universytetu Ukrainy “Kyjivskyy politetchnichnyy instytut”*. Ser. Radiotekhnika. Radioaparaturubuduвання, 2012, No. 48, pp. 75–84.
- Kaluri V. R., Shridhar V. Gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, Vol. 61, No. 4, pp. 2263–2268. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893
- Chen W., Xu X., Wen S., Cao Z. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements, *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, Vol. 5, No. 8, pp. 824–834. DOI: 10.1049/iet-rsn.2010.0289
- Xiao F., Sidiropoulos N. D., Wing-Kin M., Tranter J. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT, *Acoustics, Speech and Signal Processing : 2014 IEEE International Conference ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014 : proceedings*. Pisa, Marco Luise, 2014, P. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108
- Matthew J. S., Schmitz D. C., Anderson D. M., Douglas L. J., Jennifer T. B. Demonstration of an Electrically Small Antenna Array for UHF Direction-of-Arrival Estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, Vol. 61, No. 3, pp. 1371–1377. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227921
- Houcem G., Jean P. D., Larsys M. J. Sergio 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
- Jung-Hoon L., Jong-Hwan L., Jong-Myung W. Method for Obtaining Three- and Four-Element Array Spacing for Interferometer Direction-Finding System, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, Vol. 15, pp. 897–900. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2479224
- Chandran S. Advances: Direction-of-Arrival Estimation. Norwood, ARTECH HOUSE, 2006, 474 p.
- Milligan T. A. Modern antenna design: second edition. New Jersey, IEEE Press, Wiley-Interscience, 2005, 614 p.
- Lawrence M. J. Digital Spectral Analysis: With Applications. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1986, 492 p.
- Ed. By J. L. Volakis Antenna engineering handbook. New York, Digital Engineering Library. Mc Graw-Hill Companies, 2007, 1755 p.
- Proakis J. G., Manolakis D. G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, 4th Edition. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006, 1077 p.