

Ципоренко В. В.¹, Ципоренко В. Г.², Хоменко М. Ф.³¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна,²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна,³Старший викладач кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОДІЇ БЕЗПОШУКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ З ПОДВІЙНИМ КОРЕЛЯЦІЙНИМ ОБРОБЛЕННЯМ

Актуальність. На сьогодні пеленгування радіоелектронних засобів повинно здійснюватись в умовах складної електромагнітної обстановки, великої апріорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах реального масштабу часу реалізації. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для вказаних умов є використання широкосмугових цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів.

Мета. Метою статті є оцінка сумарних часових витрат, швидкодії та відносної часової ефективності безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням.

Метод. В роботі виконано аналітичні дослідження сумарних часових витрат кореляційно-інтерферометричного алгоритмів пеленгування та експериментальні дослідження відносної часової ефективності.

Результати. Виконано аналітичну оцінку сумарних часових витрат, швидкодії та відносної часової ефективності безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. За умов мінімальних апаратних витрат, тобто при використанні одноканальної системи обробки даних визначено, що досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу. Досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність порівняно з відомим пошуковим цифровим спектральним кореляційно-інтерферометричним методом пеленгування.

Висновки. Порівняльний аналіз показав, що досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність, яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування.

Ключові слова: кореляційно-інтерферометричний метод, безпошукове радіопеленгування, швидкодія, часова ефективність.

НОМЕНКЛАТУРА

АР – антенна решітка;

ДРВ – джерело радіовипромінювання;

ЕМО – електромагнітна обстановка;

ШПФ – швидке перетворення Фур'є.

c – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі;

d – величина антенної бази;

D_θ – робочий сектор пеленгування;

f_{IF} – значення циклічної проміжної частоти;

F_d – частота дискретизації;

h_θ – дискретність просторового кореляційного аналізу напрямку на ДРВ;

k_L, k_H – номери частотних складових спектра прийнятого радіовипромінювання на проміжній частоті, що відповідають його нижній $\omega_{IF,L}$ та верхній $\omega_{IF,H}$ граничним частотам, відповідно;

M – кількість сигналів у прийнятій суміші;

$n_1(t), n_2(t)$ – власний адитивний білий гаусів шум першого та другого радіоканалів;

$N_{\theta,max}$ – максимальна кількість пеленгів, яку можна отримати за секунду;

N_S – кількість набраних часових відліків прийнятих сумішей радіовипромінювань;

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

$S_1(t), S_2(t)$ – сигнал, що приймається першою та другою антеною;

t – змінна часу;

T_a – час аналізу прийнятих сумішей радіовипромінювань;

T_P – сумарні часові витрати для оцінки одного пеленга;

T_{SA} – часові витрати спектрального аналізу на проміжній частоті прийнятих сумішей радіовипромінювань;

T_1 – тривалість однієї операції комплексного множення з накопичуванням;

T_C – витрати подвійного кореляційного оброблення спектрів;

T_V – сумарні часові витрати на обробку сигналів відомого пошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування;

$U_1(t), U_2(t)$ – прийнята адитивна суміш радіовипромінювань першою та другою антеною;

$U_1(\omega_{IF,k}), U_2(\omega_{IF,k})$ – амплітудні спектри прийнятих сумішей радіовипромінювань, отримані на проміжній частоті;

Δ – смуга пропускання радіоприймача пеленгатора;

$\Delta\omega$ – частотний перетворювальний зсув;

$\Delta\varphi_{\Delta,k} = \Delta\varphi(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) - \Delta\varphi(\omega_{IF,k})$ – різницевий фазовий спектр другого добутку спектрів сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$;

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

θ – випадковий невідомий напрямок;

μ_T – відносна часова ефективність;

τ_S – апіорі невідома затримка радіосигналу, що є випадковою величиною;

$\hat{\tau}_D$ – оцінка затримки сигналу між двома антенами;

$\omega_{IF,L}$, $\omega_{IF,H}$ – нижня та верхня граничні частоти

прийнятого радіовипромінювання на проміжній частоті;

ω_{IF} – значення колової проміжної частоти.

ВСТУП

На сьогодні в автоматизованих системах радіомоніторингу пеленгування радіоелектронних засобів повинно здійснюватись в умовах складної електромагнітної обстановки (ЕМО), великої апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах реального масштабу часу реалізації. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для вказаних умов є використання широкосмугових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів із застосуванням цифрового оброблення комплексних спектрів прийнятої суміші радіовипромінювань [1].

Основною перевагою кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точність пеленгування джерел широкосмугових радіовипромінювань при невеликих (менше 0дБ) відношеннях сигнал/шум. 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 розрізнявальну здатність [2].

Зазвичай кореляційно-інтерферометричне пеленгування реалізується пошуковим компенсаційним методом з пошуком такого значення компенсуючої затримки, яке забезпечує максимум взаємної кореляційної функції. Недоліком цього методу є великі часові або апаратні витрати та неможливість пеленгування джерел радіовипромінювань із розширеним спектром у реальному масштабі часу з високою точністю. Тому дослідження по підвищенню швидкодії кореляційно-інтерферометричного пеленгування при використанні одноканального корелятора при забезпеченні високої точності є актуальною задачею.

Таким чином, не вирішеною раніше частиною загальної проблеми розробки швидкодіючих кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є дослідження швидкодії безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Відповідно до не вирішеної раніше проблеми розробки і дослідження ефективності кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, метою статті є: оцінка сумарних часових витрат T_P , швидкодії $N_{\theta,\max}$ та відносної часової ефективності μ_T безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

– оцінка сумарних часових витрат для отримання одного пеленгу згідно досліджуваного та відомого пошукового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування;

– оцінка швидкодії пеленгування;

– відносної часової ефективності досліджуваного методу шляхом моделювання.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

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

В роботі [3] запропоновано кореляційний метод пеленгування, що має підвищену точність пеленгування. Метод базується на збільшенні крутизни взаємної кореляційної пеленгаційної характеристики. Однак швидкодія пеленгування та можливість роботи пеленгатора в реальному масштабі часу не досліджена.

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 багатітераційний компенсаційний алгоритм оцінки затримки прийому радіовипромінювання рознесеними в просторі пеленгаційними каналами. Це обумовлює низьку швидкодію пеленгування.

В роботі [6] в результаті проведених досліджень безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням отримано аналітичні оцінки дисперсії похибки пеленгування для умов великого та малого відношення сигнал/шум на вході пеленгаційних каналів. Проведено імітаційне моделювання роботи пеленгатора та визначено його основні точнісні характеристики. Актуальним є подальше його дослідження з метою мінімізації обчислювальних витрат і підвищення швидкодії пеленгування.

У роботах [7–9] досліджені нелінійні спектральні методи пеленгування, які забезпечують високу просторову роздільну здатність прийнятих випромінювань. Такі методи мають ряд суттєвих для систем радіомоніторингу недоліків, таких як великий час обробки сигналів, що в кілька разів більший ніж для пошукового кореляційно-інтерферометричного методу пеленгування; необхідність точної апіорної інформації про кількість прийнятих в суміші випромінювань; зміщення оцінок напрямків, що погіршує точність пеленгування; втрата стійкості роботи при низьких (близько 10дБ) входних відно-

шеннях сигнал/шум. В результаті часова 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, 2].

В роботах [10–12] досліджено застосування АР різної конфігурації для покращення ефективності пеленгування ДРВ. Застосування АР забезпечує можливість швидкого просторового сканування в широкому робочому секторі, можливість ефективного подавлення завад.

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

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Виконаємо аналіз швидкодії радіопеленгатора з мінімальними апаратурними витратами, що працює згідно безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням [6].

Нехай в горизонтальній площині з випадкового невідомого напрямку θ приймається квазінеперервний випадковий стаціонарний сигнал $S(t)$ двома радіоканалами, що рознесені у просторі на величину d антенної бази і мають статистично незалежні власні шуми $n_1(t)$ і $n_2(t)$ відповідно. Нехай $S_1(t)$ – сигнал, що приймається в адитивній суміші $U_1(t)$ зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n_1(t)$ впродовж часового інтервалу $t \in [0, T_a]$ першою антенною, а $S_2(t)$ – сигнал, що приймається в адитивній суміші $U_2(t)$ зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n_2(t)$ також впродовж часового інтервалу $t \in [0, T_a]$ другою антенною. Шуми $n_1(t)$ і $n_2(t)$ та сигнали $S_1(t)$ та $S_2(t)$ є обмеженими смугою Δ . Вихідні умови запишемо наступним чином:

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

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

$$\hat{\theta} = \arccos(c \cdot \hat{\tau}_D / d);$$

$$\hat{\tau}_D = (1 / \Delta\omega) \cdot \arctg \frac{\sum_{k=k_L}^{k_H} U_1(\omega_{IF,k}) \cdot U_2(\omega_{IF,k}) \cdot U_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot \sin[\Delta\varphi_{\Delta,k}]}{\sum_{k=k_L}^{k_H} U_1(\omega_{IF,k}) \cdot U_2(\omega_{IF,k}) \cdot U_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot \cos[\Delta\varphi_{\Delta,k}]} \quad (2)$$

Для аналізу швидкодії радіопеленгатора оцінимо часові витрати на оброблення $U_1(t)$ та $U_2(t)$ в смузі Δ .

Особливістю алгоритму оброблення (2) прийнятих радіовипромінювань $U_1(t)$ та $U_2(t)$ є використання алгоритму ШПФ. Оскільки основною операцією, що виконується при такій реалізації кореляційно-інтерферометричного пеленгування є множення з накопичуванням [13], то тривалість пеленгування доцільно оцінювати через загальну кількість операцій множення з накопичуванням, що необхідно виконати для оцінки пеленга на ДРВ. Швидкодію пеленгування будемо оцінювати через максимальну кількість пеленгів $N_{\theta, \max}$, яку можна отримати за секунду при заданій тривалості процесу аналізу T_a .

Структурна схема досліджуваного пеленгатора зображена на рис. 1. Особливості роботи пеленгатора рис. 1 наступні. Для пеленгування в секторі $[0; 360]^\circ$ суміш радіовипромінювань приймається двома парами антен, що розташовані у просторі під прямим кутом. При використанні двоканального радіоприймача антени А2, А3 трихелементної АР попарно з опорною антенною А1 послідовно в часі комутуються до двоканального радіоприймача із спільним гетеродином. На проміжній частоті протягом часу аналізу T_a вихідні сигнали радіоприймача перетворюються в цифрову форму і записуються в пам'ять ЕОМ. Отримані масиви відліків, прийнятих сумішей радіовипромінювань, обробляються згідно рівняння (2), розробленого в [6] методу пеленгування.

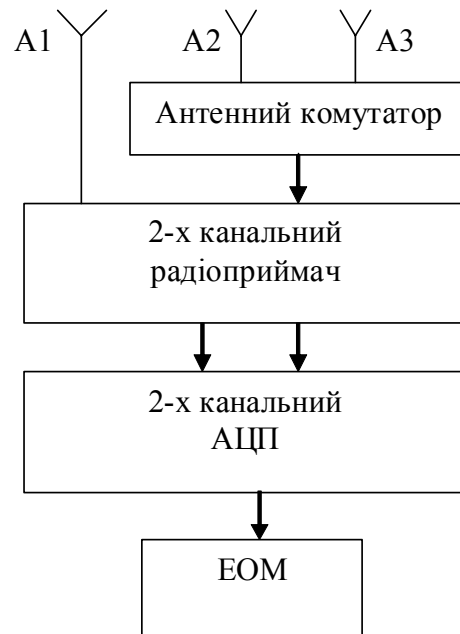


Рисунок 1 – Структурна схема досліджуваного пеленгатора

Тривалість виконання ШПФ та кореляційного аналізу доцільно визначати через кількість операцій комплексного множення [13]. В результаті для оцінки одного пеленга сумарні часові витрати T_P складаються з витрат часового спектрального аналізу T_{SA} сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$ радіовипромінювань, що виконується на проміжній частоті $\omega_{IF,k}$, витрат T_C подвійного кореляційного оброблення, що складається з першого перемноження комплексних спектрів: $U_1(j\omega_{IF,k}) \cdot U_2(j\omega_{IF,k})$, другого перемноження отриманого взаємного комплексного спектра $U_1(j\omega_{IF,k}) \cdot U_2(j\omega_{IF,k})$ на його зсунуту на $\Delta\omega$ за частотою копію $U_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)$:

$$T_P = T_{SA} + T_C. \quad (3)$$

Для мінімізації часових витрат часового спектрального аналізу його доцільно реалізувати на основі швидких алгоритмів, наприклад, алгоритму ШПФ [13]. В цьому випадку тривалість T_{SA} часового спектрального аналізу сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$ радіовипромінювань дорівнює:

$$T_{SA} = 2 \cdot N_S \cdot \log_2 N_S \cdot T_1. \quad (4)$$

Часові витрати подвійного кореляційного оброблення:

$$T_C = (0,5 \cdot N_S + 0,5 \cdot N_S) \cdot T_1 = N_S \cdot T_1. \quad (5)$$

Таким чином, загальні часові витрати T_P на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів згідно безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням з урахуванням рівнянь (3)–(5) дорівнюють:

$$T_P = T_1 \cdot (2 \cdot N_S \cdot \log_2 N_S + N_S). \quad (6)$$

Швидкодія пеленгування $N_{\theta, \max}$ повинна визначатися за умови оброблення прийнятої суміші радіовипромінювань в реальному масштабі часу, тобто при $T_P < T_a$ наступним чином:

$$N_{\theta, \max} = M / T_a. \quad (7)$$

Для прикладу, для типових умов [1, 2] ЕМО при пеленгуванні в реальному масштабі часу та при мінімальній кількості радіовипромінювань $M=1$ в межах смуги Δ , та при заданій тривалості процесу аналізу $T_a = 10^{-3}$ с забезпечується максимальна швидкодія $N_{\theta, \max} = M / T_a = 1 / 10^{-3} = 10^3$ пеленгів за секунду.

Виконаємо дослідження відносної часової ефективності μ_T реалізації безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням порівняно з відомим цифровим кореляційним пошуковим методом пеленгування, що також використовує цифрові методи спектрального аналізу [4, 5].

Відмінністю відомих пошукових методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування є знаходження кореляційної функції з кількістю кроків (D_θ / h_θ) перемно-

жування N_S спектральних відліків двох сигналів. З урахуванням цього сумарні часові витрати T_V на обробку сигналів відомого методу пеленгування дорівнюють:

$$T_V = T_1 \cdot (2 \cdot N_S \cdot \log_2 N_S + 0,5 N_S \cdot (D_\theta / h_\theta)). \quad (8)$$

Аналіз рівняння (8) показує, що часові витрати T_V суттєво залежать від h_θ . Цей фактор зумовлює велику тривалість оброблення та загальні часові витрати $T_V > T_a$ більші за тривалість аналізу радіовипромінювань, що робить неможливим пеленгування в реальному масштабі часу з високою точністю за умови застосування одноканальної системи оброблення даних, наприклад, сучасного сигнального процесора типу TMS320. Можливе також суттєве збільшення дискретності оцінки пеленгу h_θ , що погіршує точність пеленгування, або застосування багато процесорної схеми оброблення, що суттєво збільшує вартість пеленгатора.

Швидкодія пеленгування при $T_V > T_a$ буде визначатися згідно рівняння: $N_\theta = M / T_V < N_{\theta, \max}$.

В результаті відносна часова ефективність μ_T безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням з урахуванням (6) та (8) визначається згідно з рівнянням:

$$\mu_T = \frac{T_V}{T_P} = \frac{2 \cdot \log_2 N_S + 0,5 \cdot (D_\theta / h_\theta)}{2 \cdot \log_2 N_S + 1}. \quad (9)$$

Аналіз рівняння (9) показує, що оскільки $(D_\theta / h_\theta) \gg 2 \cdot \log_2 N_S$, то $\mu_T \gg 1$, що підтверджує високу ефективність досліджуваного методу пеленгування.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Проведемо з урахуванням рівняння (6) дослідження залежності загальних часових витрат T_P від ширини смуги пропускання радіопеленгатора Δ для наступних типових початкових умов: значення проміжної частоти $f_{IF} = 10,7$ МГц; частота дискретизації F_d вибрана згідно теореми відліків: $F_d = 2 \cdot (f_{IF} + 0,5\Delta)$; тривалість процесу аналізу в кожному пеленгаційному радіоканалі $T_a = 10^{-3}$ с; кількість часових сигнальних відліків визначається згідно з рівнянням: $N_S = T_a \cdot F_d$; робочий сектор пеленгування $D_\theta = 360^\circ$; крок оцінки напрямку $h_\theta = 0,6^\circ$.

Дослідження проведемо для умови, що цифрове оброблення сигналів буде виконуватись з використанням ноутбука середньої обчислювальної продуктивності, який, наприклад, має $T_1 = 0,1 \cdot 10^{-9}$ с при перемноженні 32-розрядних комплексних чисел, що гірше ніж для кращих сигнальних процесорів типу TMS320c6678 [13].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Отримані згідно рівнянь (6) та (8) залежності T_P та T_V від ширини смуги пропускання радіопеленгатора Δ [МГц] для досліджуваного та відомого методів пеленгування наведено на рис. 2. Також горизонтальною лінією показано тривалість T_a процесу аналізу.

Аналіз рис. 2 показує, що загальні часові витрати T_P на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів згідно алгоритму (2) менші за тривалість T_a процесу аналізу при $\Delta < 500$ МГц, а для відомого пошукового радіопеленгатора при $\Delta < 10$ МГц навіть при визначенні кореляційної функції з кроком $h_\theta = 0,6^\circ$. Великий крок оцінки напрямку $h_\theta = 0,6^\circ$ спричиняє додаткову методичну похибку пеленгування до $h_\theta / 2 = 0,3^\circ$.

Таким чином, для пеленгування згідно безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням в реальному масштабі часу може бути використаний радіоприймач з шириною смуги пропускання до 500 МГц та одноканальною системою оброблення даних, що дозволить здешевити комплекс радіомоніторинга шляхом використання ноутбука середньої обчислювальної продуктивності замість потужного багатоканального комплексу. Також у досліджуваного радіопеленгатора похибка дискретності $h_\theta / 2 = 0,3^\circ$ пеленгування відсутня внаслідок прямої оцінки затримки сигналу.

Проведемо дослідження залежності відносної часової ефективності μ_T від ширини смуги Δ пропускання радіоприймача пеленгатора при $D_\theta = 360^\circ$; $h_\theta = 0,1^\circ$; $T_a = 10^{-3}$ с. Отриману залежність, згідно з рівнянням (9), наведено на рис. 3.

Аналіз залежностей на рис. 3 показує, що відносна часова ефективність μ_T відповідного запропонованого пеленгатора обернено пропорційна ширині смуги Δ , та перевищує 100 разів при $\Delta < 100$ МГц.

Таким чином, виконані дослідження швидкодії показали, що досліджений безпошуковий пеленгатор забезпечує пеленгування усіх радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу, має високу відносну часову ефективність μ_T , яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування. При цьому швидкодія пеленгування становить $N_{\theta, \max} = M / T_a = 1 / 10^{-3} = 10^3$ пеленгів за секунду.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отримана оцінка сумарних часових витрат T_P та відносної часової ефективності μ_T безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням показала, що досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу. Досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність μ_T , яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування.

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.

В подальшому необхідно провести оптимізацію конфігурації АР для використання досліджуваного методу пеленгування в широкому діапазоні робочих частот.

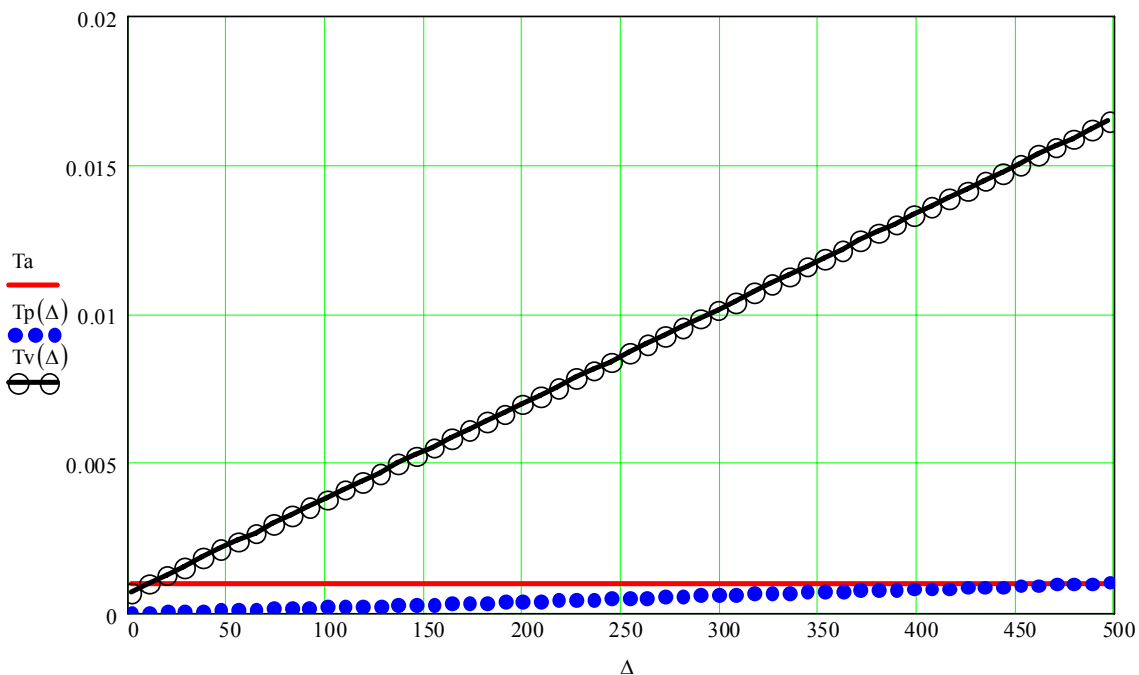


Рисунок 2 – Залежності загальних часових витрат T_P та T_V досліджуваного та відомого кореляційно-інтерферометричного пеленгатора від ширини Δ

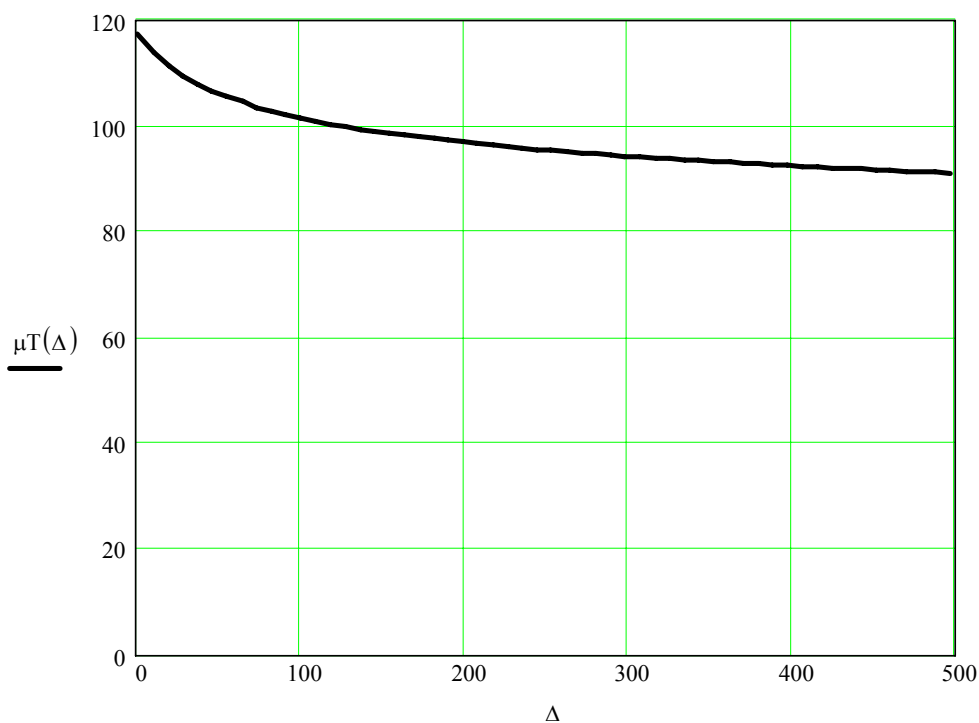


Рисунок 3 – Залежність відносної часової ефективності μ_T від ширини смуги Δ

ВИСНОВКИ

Виконано оцінку сумарних часових витрат T_P для отримання одного пеленга відомого пошукового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування та досліджуваного безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. За умов мінімальних апаратних витрат, тобто при використанні одноканальної системи обробки даних визначено, що досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу.

Оцінено швидкодню пеленгування. Для типових умов ЕМО при пеленгуванні в реальному масштабі часу та при мінімальній кількості радіовипромінювань $M = 1$ в межах смуги Δ пропускання радіоканалів пеленгатора, тривалості процесу аналізу $T_a = 10^{-3}$ с, забезпечується максимальна швидкодня $N_{\theta, \max} = 10^3$ пеленгів за секунду.

Отримано аналітичну оцінку відносної часової ефективності μ_T досліджуваного безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. В результаті моделювання визначено, що досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність μ_T , яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування.

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. Слободянюк П. В. Довідник з радіомоніторингу / П. В. Слободянюк, В. Г. Благодарний, В. С. Ступак; під заг. ред. П. В. Слободянюка. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.: іл.

3. Sorochan A. G. Correlation direction finder with two OMNI-directional antennas / A. G. Sorochan // Microwave and Telecommunication Technology : 23rd International Conference CriMiCo-2013, Sevastopol, 8–14 September, 2013 : proceedings. – Crimea, 2013. – P. 298–299.

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. Дослідження безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з подвійним кореляційним обробленням / В. В. Ципоренко // Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник «Радіотехніка». – 2012. – № 170. – С. 172–179.

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/ASSP.2014.6855108
10. 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
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. 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
13. 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 22.03.2017.
Після доробки 27.04.2017.

Ципоренко В. В.¹, Ципоренко В. Г.², Хоменко Н. Ф.³

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

³Старший преподаватель кафедры радиотехники, радиоэлектронных аппаратов и телекоммуникаций Житомирского государственного технологического университета, Житомир, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ БЕСПОИСКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО КОРРЕЛЯЦИОННО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ С ДВОЙНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Актуальность. На сегодня пеленгование радиоэлектронных средств должно осуществляться в условиях сложной электромагнитной обстановки, большой априорной неопределенности относительно параметров радиоизлучений, а также в условиях реального масштаба времени реализации. Перспективным направлением реализации пеленгования для указанных условий является использование широкополосных цифровых корреляционно-интерферометрических радиопеленгаторов.

Цель. Целью статьи является оценка суммарных временных затрат, быстродействия и относительной временной эффективности беспойскового цифрового метода корреляционно-интерферометрического пеленгования с двойной корреляционной обработкой.

Метод. В работе выполнены аналитические исследования суммарных временных затрат корреляционно-интерферометрических алгоритмов пеленгования и экспериментальные исследования относительной временной эффективности.

Результаты. Выполнено аналитическую оценку суммарных временных затрат, быстродействия и относительной временной эффективности беспойскового цифрового метода корреляционно-интерферометрического пеленгования с двойной корреляционной обработкой. При минимальных аппаратных затратах, то есть при использовании одноканальной системы обработки данных, определено, что исследованный беспойсковый метод пеленгования обеспечивает пеленгование радиоизлучений, попадающих в полосу частот одновременного анализа с возможной шириной до 500 МГц в реальном масштабе времени. Исследованный метод пеленгования имеет высокую относительную временную эффективность по сравнению с известным поисковым цифровым спектральным корреляционно-интерферометрическим методом пеленгования.

Выводы. Сравнительный анализ показал, что исследованный метод пеленгования имеет высокую относительную временную эффективность, которая в 100 раз больше, чем у известного поискового цифрового спектрального корреляционно-интерферометрического метода пеленгования.

Ключевые слова: корреляционно-интерферометрический метод, беспойсковое радиопеленгование, быстродействие, временная эффективность.

Tsyorenko V. V.¹, Tsyorenko V. G.², Khomenko M. F.³

¹PhD, Associate professor, Associate professor of Department of Radio Engineering, Radioelectronic Devices and Telecommunication Systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

²PhD, Associate professor, Associate professor of Department of Radio Engineering, Radioelectronic Devices and Telecommunication Systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

³Senior lecturer of Department of Radio Engineering, Radioelectronic Devices and Telecommunication Systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

RESEARCH OF THE FAST-ACTION OF THE DIRECT DIGITAL METHOD OF SPECTRAL CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDING WITH DOUBLE CORRELATION PROCESSING

Context. At present, the direction finding of radio electronic means should be carried out under conditions of a complex electromagnetic situation, a large a priori uncertainty regarding the parameters of radio emissions, and also in conditions of a real-time implementation. A promising direction in the direction finding implementation for these conditions is the use of broadband digital correlation-interferometric radio direction finders.

Objective. The aim of the article is to estimate the total time costs, speed and relative time efficiency of the direct digital method of spectral correlative-interferometric direction finding with double correlation processing.

Method. Analytic studies of total time costs of correlation-interferometric direction finding algorithms and experimental studies of relative time efficiency are performed in the work.

Results. Analytical estimation of total time costs, speed and relative time efficiency of the direct digital method of spectral correlative-interferometric direction finding with double correlation processing is performed. With minimal hardware costs, that is, using a single-channel data processing system, it is determined that the investigated direct direction finding method provides direction finding of radio emissions entering the frequency band of simultaneous analysis with a possible width of up to 500 MHz in real time. The investigated direction finding method has relative time efficiency in 100 times higher in comparison with the known search digital spectral correlation-interferometric method of direction finding.

Conclusions. Comparative analysis has shown that the investigated direction finding method has a high relative time efficiency exceeding 100 times in comparison with the known search digital spectral correlation-interferometric method of direction finding.

Keywords: correlative-interferometric method; direct direction finding; fast-action; time efficiency.

REFERENCES

1. Rembovskiy A. M. Ashychmin A. V., Kozmin V. A. ; pod red. A. M. Rembovskogo.; 2-ye izd., pererab. i dop. Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva. Moscow, Goriacziaaya liniya, Telekom, 2010, 624 p.
2. Slobodyanuk P. V., Blagodarny V. G., Stupak V. S. ; Pid. zag. red. P. V. Slobodyanuka. Dovidnyk z radiomonitoringu. Nizhyn, TOV «Vydavnytstvo «Aspekt-Poligraf», 2008, 588 p.: il.
3. Sorochan A. G. Correlation direction finder with two OMNI-directional antennas, *Microwave and Telecommunication Technology : 23rd International Conference CriMiCo-2013, Sevastopol, 8–14 September, 2013 : proceedings.* Crimea, 2013, pp. 298–299.
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. Tsymporenko V. V. Doslidzennua bezpohukovogo tsifrovogo metodu spektralnogo koreluatsijno-interferometrychnogo radiopelenguvannua z podvijnym koreluatsijnym obroblyennuam, *Vseukrainskiy mizhvidomchyj naukovo-tehnichnyj zbirnyk «Radiotekhnika»*, 2012, No. 170, pp. 172–179.
7. 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
8. 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
9. 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, pp. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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.