

Експериментальне дослідження точності безошуккових методів спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування

Виконано експериментальну оцінку похибки пеленгування для безошуккових методів спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування. Результати експериментальних досліджень на лабораторному макеті узгоджуються з результатами теоретичних досліджень і підтверджують працездатність та ефективність розроблених методів радіопеленгування. Експериментальна похибка оцінки пеленгу лежить у межах (0,25–0,8) градусів для двоелементної антенної решітки і становить 0,1 градуса для методу пеленгування з 16-елементною антенною решіткою. Вона децю більша за методичні похибки оцінки пеленга, що з урахуванням похибки аналого-цифрового перетворювача (АЦП) узгоджується з теорією. В цілому точність досліджених методів практично однакова порівняно з класичними за значно більшої швидкодії розроблених безошуккових методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування.

Точність визначення затримки і відповідно радіопеленгування визначається відношенням сигнал / шум, враховуючи завади в лініях зв'язку, шуми аналого-цифрового перетворення, та дискретністю визначення затримки. Враховуючи невелику розрядність лабораторного АЦП, що дорівнює 8 біт, а також цифрового пристрою спектрального аналізу і оброблення спектру, що дорівнює 32 біти, здебільшого на загальний рівень шумів макету впливають завади в лініях зв'язку та шуми квантування АЦП. Швидкодія радіопеленгування визначається необхідною кількістю циклів вимірювання часу затримки сигналу. При цьому досліджені безошуккові методи кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування мають один цикл визначення взаємної кореляційної функції, а відомі компенсаційні методи кореляційно-інтерферометричного пеленгування – тисячі циклів такої оцінки, що в цілому зумовлює виграш за швидкодією досліджених методів більше ніж на порядок.

Ключові слова: *кореляційно-інтерферометричний пеленгатор; безошукковий метод; експериментальна оцінка точності.*

Актуальність теми. Радіомоніторинг радіоелектронних засобів є ефективним способом моніторингу використання радіочастотного ресурсу. Загальна кількість радіоелектронних засобів, параметри яких необхідно контролювати, постійно збільшується, особливо мобільних. Такі засоби використовуються з просторовими, частотними і часовими параметрами модуляції, що швидко змінюються. Тому найбільш інформативним методом радіомоніторингу на сьогодні є радіопеленгування та оцінка координат джерел радіовипромінювання (ДРВ) [1, 2].

Перспективним напрямом здійснення радіопеленгування є використання цифрових спектральних кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що поєднують високу точність, завадостійкість та швидкодію пеленгування навіть у складній електромагнітній обстановці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Основною перевагою кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точність пеленгування та можливість роботи за відношення сигнал / шум навіть менше за 0 дБ. Підвищення завадозахищеності радіопеленгування забезпечує застосування антенних решіток (АР) з синтезом багатопелюсткової діаграми спрямованості. Радіопеленгатори з АР забезпечують найвищу точність оцінки напрямку на джерело радіовипромінювання. Результати досліджень точності спектральних кореляційно-інтерферометричних методів пеленгування представлені в багатьох наукових працях.

У [3] виконано аналіз залежності середнього квадратичного відхилення (СКВ) оцінки пеленга під час використання безошуккового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування радіовипромінювань з розширеним спектром від значення частотного перетворювального зсуву для циклічної моделі його формування. Показано, що похибка пеленгування суттєво залежить від значення частотного перетворювального зсуву, і ця залежність має немонотонний характер. Виконано оптимізацію досліджуваного методу. Проведено програмне моделювання роботи двоканального радіопеленгатора та досліджена його точність для досліджуваного безошуккового алгоритму пеленгування. Результати моделювання повністю узгоджуються з результатами аналітичної оптимізації. Отримані в результаті моделювання залежності СКВ оцінки пеленга від відношення сигнал / шум показали, що під час застосування оптимального значення частотного перетворювального зсуву та циклічної моделі досліджуваного методу пеленгування забезпечує можливість безошуккової оцінки напрямку на ДРВ з широкосмуговими випромінюваннями з СКВ оцінки пеленга в межах (1,13; 0,036) градусів при відношенні сигнал / шум (0; 30) дБ відповідно.

У [4] проведено аналітичну оцінку сумарних часових витрат радіопеленгатора, що працює згідно з безпошуковим спектральним методом дисперсійно-кореляційного радіопеленгування. Проведено дослідження залежності відносної часової ефективності від ширини смуги пропускання радіоприймача пеленгатора. Під час використання одноканальної системи обробки даних визначено, що досліджений безпошуковий метод пеленгування в реальному масштабі часу забезпечує пеленгування радіовипромінювань у смугі пропускання з шириною до 250 МГц. Досліджений метод пеленгування має підвищену в 45 разів відносну часову ефективність.

У [5] виконано оцінку сумарних часових витрат пеленгування згідно з безпошуковим цифровим методом спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. За умов мінімальних апаратних витрат під час використання одноканальної системи обробки даних визначено, що цей метод забезпечує пеленгування радіовипромінювань у реальному часі з використанням ширини смуги пропускання радіоприймача до 500 МГц. Оцінено швидкодію пеленгування. В результаті моделювання визначено, що досліджений метод пеленгування має вищу на 2 порядки відносну часову ефективність, порівняно з відомим пошуковим методом пеленгування. Однак експериментальну оцінку точності даних методів не проведено.

У [6] проведено теоретичну оптимізацію параметрів безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу, а також порівняльний аналіз аналітичних розрахунків та результатів моделювання. В результаті моделювання отримано залежність методичної похибки оцінки пеленга та середньої квадратичної оцінки пеленга при дії нормального шуму від значень оптимізованих параметрів. Проведено теоретичну оптимізацію параметрів дослідженого методу та визначено, що доцільним є використання симетричного рознесення на 28 кроків 64-елементної АР для мінімізації дисперсії похибки оцінки спрямування на ДРВ та забезпечення максимальної точності пеленгування.

У [7] досліджено спосіб пеленгування за допомогою матриці з часовою модуляцією та з використанням компенсації неідеального модулюючого імпульсу. Застосовано реконструювання потрібної форми огинаючої модулюючого імпульсу. Отримано аналітичне рівняння огинаючої. Однак ефективність запропонованих рішень показана без урахування впливу завад та апаратних похибок обладнання.

У [8] запропоновано метод пеленгування з оцінкою просторового спектра. Використовується лінійна АР та один приймальний радіоканал. Особливістю методу є оцінка матриці автокореляції для цифрового спектра сумарного сигналу решітки. В роботі запропоновано алгоритм оцінки напрямків на джерела сигналів, у тому числі і для оцінки напрямків на когерентні джерела сигналу. Алгоритм є ефективним для когерентних за частотою перешкод. Однак одноканальність методу та необхідність обчислення матриці автокореляції зумовлює його низьку швидкодію та високу обчислювальну складність.

У [9] запропоновано метод пеленгування із використанням двоелементної АР. Модульована за часом матриця не синхронізує вибірки. Використовуються також асиметричні часові послідовності, що спрощує систему.

У [10] кут місця моделюється як випадкова величина, розподіл ймовірностей якого відображає характеристики багатопроменевого поширення. Запропоновано новий метод координованого позиціонування на основі баєсівської оцінки з короткохвильовою антибагатопроменевою. Оцінене значення кута місця змінюється за допомогою розподілу ймовірностей кута місця. Розрахункове значення модифікованого кута місця підставляється в псевдолінійне рівняння спостереження, а оцінене значення цільового положення отримується за допомогою ітераційного алгоритму розкладання матриці. Результат узгодженого позиціонування отримується за допомогою повторного алгоритму ітерації матричної декомпозиції. Запропонований метод має кращу антибагатопроменеву здатність, ніж традиційні методи, і більшу узгоджену точність позиціонування. Недоліком цього методу є також висока обчислювальна складність.

У [11] запропоновано ефективний алгоритм пасивної оцінки напрямку приходу сигналу для гібридної системи зв'язку міліметрового діапазону. Алгоритм забезпечує зменшення обчислювальної складності обробки, але має обмеження на частотний діапазон застосування.

Таким чином, удосконалення та експериментальні дослідження точності кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є актуальним завданням.

Невирішеною частиною загальної проблеми удосконалення швидкодійних кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є експериментальні дослідження точності безпошукових методів спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування.

Метою статті є експериментальне дослідження точності безпошукових методів спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з використанням макета пеленгатора.

Викладення основного матеріалу. На зробленому макеті проведено дослідження точності розроблених алгоритмів радіопеленгування шляхом оброблення реального радіосигналу базової станції

мобільного зв'язку NMT-450 з несучою частотою $f_s = 464 \text{ МГц}$ та шириною спектра $\Delta f_s = 1,3 \text{ МГц}$, оціненою за рівнем -3 дБ ($A_{0,707}$), що зазначено на рисунку 1.

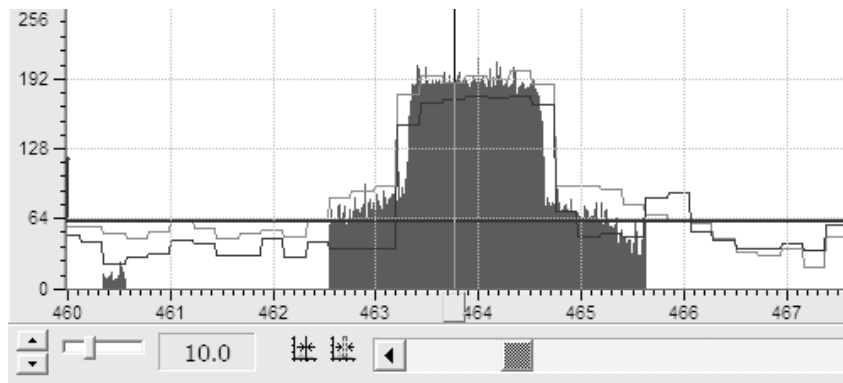


Рис. 1. Спектр прийнятого радіовипромінювання

На початку проведення досліджень виміряна та врахована у подальших дослідженнях неідентичність комплексних передаточних характеристик пеленгаційних каналів макета шляхом подачі сигналу на два канали без лінії затримки з подальшим визначенням та порівнянням комплексних спектрів сигналів пеленгаційних каналів.

Зовнішній вигляд макета пеленгатора показано на рисунку 2. Прийнятий сигнал (рис. 1) з виходу проміжної частоти радіоприймача подається на два канали його проходження – без лінії затримки на перший вхід АЦП та з лінією затримки на другий вхід АЦП. З виходу АЦП отримані цифрові сигнали пеленгаційних радіоканалів записуються в файли на комп'ютері та в Mathcad-моделях пеленгаторів обробляються згідно з розробленими в [3–6] методами пеленгування.



Рис. 2. Зовнішній вигляд макета пеленгатора

Початкові умови досліджень: робоча частота сигналу $f_s = 464 \text{ МГц}$; ширина спектра $\Delta f_s = 1,3 \text{ МГц}$; значення затримки, внесеної на проміжній $f_{ПЧ} = 10,7 \text{ МГц}$ частоті $\tau_f = 0,05 \text{ мкс}$; кількість часових відліків $N_s = 4096$; частота дискретизації $f_d = 50 \text{ МГц}$.

Оцінимо еквівалентне значення затримки τ_s сигналу на робочій частоті f_s радіосигналу за заданою затримкою τ_f на проміжній частоті за формулою:

$$\tau_s = \tau_f \cdot (f_{ПЧ} / f_s), \quad (1)$$

де $f_{ПЧ}$ – значення проміжної частоти; f_s – робоча частота сигналу.

1) Для $\tau_{ff} = 0,05 \text{ мкс}$:

$$\tau_s = 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 1,153 \cdot 10^{-9} \text{ с}. \quad (2)$$

Відповідний еквівалентний напрямок при антенній базі 1 м оцінимо за формулою:

$$\alpha = \arccos \frac{c \cdot \tau_s}{d},$$

де c – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі;

d – антенна база;

τ_s – оцінка значення часу затримки поширення радіосигналів від джерела до двох приймальних антен.

$$\text{Тоді } \alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,153 \cdot 10^{-9}}{1} = \arccos(0,346) = 69,8^\circ;$$

2) для $\tau_{ff} = 0,1 \text{ мкс}$:

$$\tau_s = 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 2,306 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

$$\alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2,306 \cdot 10^{-9}}{1} = \arccos(0,692) = 46^\circ;$$

3) для $\tau_{ff} = 0,05 \text{ мкс}$ для досліду з 16-елементною АР:

$$\tau_s = 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 1,153 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Відповідний еквівалентний напрямок при кроку 16-елементної АР 0,4 м оцінимо за формулою (2):

$$\alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,153 \cdot 10^{-9}}{0,4} = \arccos(0,865) = 30,1^\circ.$$

Оцінимо значення вхідного відношення сигнал / шум A_s / A_N на виході радіоканалу за спектром сигналу (рис. 1):

$$q = 20 \lg(A_s / A_N) = 20 \lg(192 / 20) = 20 \text{ дБ}.$$

Рівень шумів пеленгатора A_N визначався за середнім значенням амплітудного спектра шуму на прилеглих ділянках до амплітудного спектра сигналу.

Оцінимо еквівалентні напрямки на ДРВ для вимірних затримок відповідно до рівнянь (1) та (2).

1) для вимірної $\tau_{ff} = 0,051 \text{ мкс}$:

$$\tau_s = 0,051 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,051 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 1,176 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Відповідний еквівалентний напрямок при антенній базі 1 м оцінимо за формулою:

$$\alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,176 \cdot 10^{-9}}{1} = \arccos(0,353) = 69,3^\circ.$$

Для вимірної $\tau_{ff} = 0,102 \text{ мкс}$:

$$\tau_s = 0,102 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,102 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 2,35 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Відповідний еквівалентний напрямок при антенній базі 1 м оцінимо за формулою:

$$\alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2,35 \cdot 10^{-9}}{1} = \arccos(0,705) = 45,2^\circ;$$

2) для вимірної $\tau_{ff} = 0,0505 \text{ мкс}$:

$$\tau_s = 0,0505 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,0505 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 1,165 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Відповідний еквівалентний напрямок при антенній базі 1 м оцінимо за формулою:

$$\alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,165 \cdot 10^{-9}}{1} = \arccos(0,3495) = 69,55^\circ.$$

Для вимірної $\tau_{ff} = 0,1015 \text{ мкс}$:

$$\tau_s = 0,1015 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,1015 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 2,34 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Відповідний еквівалентний напрямок при антенній базі 1 м оцінимо за формулою:

$$\alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2,34 \cdot 10^{-9}}{1} = \arccos(0,702) = 45,4^\circ;$$

3) для вимірної $\tau_{ff} = 0,0506 \text{ мкс}$:

$$\tau_s = 0,0506 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,0506 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 1,167 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Відповідний еквівалентний напрямок при антенній базі 1 м оцінимо за формулою:

$$\alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,167 \cdot 10^{-9}}{1} = \arccos(0,35) = 69,46^\circ.$$

Для вимірної $\tau_{ff} = 0,1017 \text{ мкс}$:

$$\tau_s = 0,1017 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,1017 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 2,345 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Відповідний еквівалентний напрямок при антенній базі 1 м оцінимо за формулою:

$$\alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2,345 \cdot 10^{-9}}{1} = \arccos(0,703) = 45,3^\circ;$$

4) для дослідження 16-елементної АР в послідовному режимі сигнали приймалися попарно першим опорним каналом та 2, 3, ... 17-м. Задана затримка відповідно збільшувалася від $\tau_{ff} = 0,05 \text{ мкс}$ до $16\tau_{ff} = 0,8 \text{ мкс}$ між першим і 17-м виходами лінії затримки. Оскільки реальні затримки вносилися на проміжній частоті за допомогою лінії затримки, розрахуємо їх еквівалентні значення для робочої частоти сигналу $f_s = 464 \text{ МГц}$.

Для вимірної $\tau_{ff} = 0,0501 \text{ мкс}$ для досліду з 16-елементною АР:

$$\tau_s = 0,0501 \cdot 10^{-6} \cdot (f_{ПЧ} / f_s) = 0,0501 \cdot 10^{-6} \cdot (10,7 / 464) = 1,155 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Відповідний еквівалентний напрямок при кроку 16-елементної АР 0,4 м оцінимо за формулою (2):

$$\alpha = \arccos \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,155 \cdot 10^{-9}}{0,4} = \arccos(0,866) = 30^\circ.$$

У таблиці 1 зазначено результати оцінки СКВ затримки $\tau_{1,вим}, \dots, \tau_{4,вим}$ та відповідних похибок пеленгування для різних заданих напрямків приходу сигналу для таких методів пеленгування:

1. Безпошукового спектрального методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування радіовипромінювань з розширеним спектром ($\tau_{1,вим}$, пох. пел. 1);
2. Безпошукового спектрального методу дисперсійно-кореляційного радіопеленгування для великої антенної бази (пох. пел. 2);
3. Безпошукового спектрального методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним дисперсійним обробленням для великої антенної бази (пох. пел. 3);
4. Безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу в апертурі 16-елементної лінійної антенної решітки (пох. пел. 4).

Обробка сигналів проводилася на розроблених програмних моделях у середовищі MathCad.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

Еквів. напрям, град.	τ_{ff} , мкс	$\tau_{1,вим}$, мкс	Пох. пел. 1, град.	$\tau_{2,вим}$, мкс	Пох. пел. 2, град.	$\tau_{3,вим}$, мкс	Пох. пел. 3, град.	$\tau_{4,вим}$, мкс	Пох. пел. 4, град.
69,8	0,05	0,0510	0,5	0,0505	0,25	0,0506	0,34	–	–
46	0,1	0,1020	0,8	0,1015	0,6	0,1017	0,7	–	–
30,1	–	–	–	–	–	–	–	0,0501	0,10

Аналіз результатів таблиці 1 показує, що результати експериментальних досліджень на лабораторному макеті узгоджуються з результатами теоретичних досліджень [3–6] і підтверджують працездатність та ефективність розроблених методів радіопеленгування.

З таблиці 1 видно, що експериментальна похибка оцінки пеленга лежить у межах (0,25–0,8) градусів для двоелементної АР і 0,1 градуса – для 16-елементної АР, і не значно вище відповідних методичних похибок, що з урахуванням похибки АЦП узгоджується з теорією. В цілому точність розроблених методів практично однакова за значно більшої швидкодії розроблених безпошукових методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування. Швидкодія радіопеленгування визначається необхідною кількістю циклів вимірювання часу затримки сигналу. При цьому дисперсійно-кореляційний метод радіопеленгування включає один цикл визначення взаємної кореляційної функції, а при відомому

спектральному кореляційно-інтерферометричному методі – до тисячі циклів. Це зумовлює суттєвий виграв за швидкістю дисперсійно-кореляційних методів більш ніж на порядок.

Точність визначення затримки і відповідно радіопеленгування лабораторного макета визначається вхідним відношенням сигнал / шум, враховуючи вплив завад у лініях зв'язку, шумами та інструментальними похибками аналого-цифрового перетворення та дискретністю визначення затримки. Враховуючи невелику розрядність АЦП, що дорівнює 8 біт, а також розрядність оброблення даних цифрового пристрою спектрального аналізу і оброблення спектрів, що дорівнює 32 біти, переважно на загальний рівень шумів макета впливають завади в лініях зв'язку та шуми квантування АЦП. Тому запропоновані методи пеленгування можуть ефективно забезпечувати підвищення точності пеленгування шляхом збільшення розрядності АЦП та кількості оброблюваних часових відліків радіосигналів.

Експериментальні значення похибки затримки для заданих умов відповідають значенням її аналітичних оцінок [3–6]. Дещо вищі експериментальні похибки зумовлені в основному невеликою розрядністю АЦП, що спричиняє відповідні похибки (шум) квантування сигналу.

Висновки. Результати експериментальних досліджень на лабораторному макеті узгоджуються з результатами теоретичних досліджень і підтверджують працездатність та ефективність розроблених методів радіопеленгування. Експериментальна похибка оцінки пеленга лежить у межах (0,25–0,8) градусів для двоелементної АР і становить 0,1 градуса для 16-елементної АР. Вона трохи вища за методичні похибки оцінки пеленга, що з урахуванням похибки АЦП узгоджується з теорією. В цілому точність досліджених методів пеленгування практично однакова порівняно з класичними за значно більшої швидкодії розроблених безпошукових методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування.

Результати досліджень можна використати під час розробки апаратури радіомоніторингу, яка функціонує в сучасних умовах багатопроменевого поширення сигналів, наприклад, в умовах міста.

Виконані експериментальні дослідження є продовженням роботи з удосконалення безпошукових спектральних методів кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування. В подальшому необхідно виконати розробку комплексного критерію ефективності роботи радіопеленгаторів з урахуванням їх основних параметрів та характеристик.

Список використаної літератури:

1. Слободянюк П.В. Довідник з радіомоніторингу / П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарний, В.С. Ступак ; за заг. ред П.В. Слободянюка. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2008. – 588 с.
2. Improving the accuracy and performance speed of the digital spectral-correlation method for measuring delay in radio signals and direction finding / A.Sabibolda, V.Tsyporenko, V.Tsyporenko et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – № 1 (9 (115)). – P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.252561.
3. Ципоренко В.В. Оптимізація безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням та циклічною моделлю частотного зсуву / В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету / Серія : Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – № 3 (74). – С. 86–95.
4. Ципоренко В.В. Оцінка часової ефективності радіопеленгатора, що працює на основі безпошукового спектрального методу дисперсійно-кореляційного радіопеленгування / В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко, О.В. Андреев // Технічна інженерія. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка». – 2020. – № 1 (85). – С. 184–190.
5. Ципоренко В.В. Дослідження швидкодії безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням / В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко, М.Ф. Хоменко // Радіоелектроніка, інформатика, управління (PIU) : науковий журнал Запорізького нац. техн. ун-ту / Серія : Радіоелектроніка та телекомунікації. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. – № 3. – С. 28–35. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-3-3.
6. Ципоренко В.В. Оптимізація безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу / В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко, Т.М. Нікітчук // Радіоелектроніка, інформатика, управління (PIU) : науковий журнал Запорізького нац. техн. ун-ту / Серія : Радіоелектроніка та телекомунікації. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. – № 3. – С. 15–24. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-3-2.
7. A Compensation Method of Nonideal Modulation Pulse for Direction Finding With Time-Modulated Array / H.Liu, J.Chen, X.Liang, R.Jin // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2022. – № 21 (8). – P. 1577–1581. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3174424.
8. Single-Channel Spatial Spectrum Estimation Direction Finding by the Time-Modulated Linear Array / X.Jiang, G.Ni, A.Cao et al. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2021. – № 20 (12). – P. 2491–2495. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3115826.
9. Direction-Finding Based on Time-Modulated Array Without Sampling Synchronization / G.Ni, C.He, Y.Liu et al. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2020. – № 19 (12). – P. 2149–2153. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3025328.
10. Coordinated Positioning Method for Shortwave Anti-Multipath Based on Bayesian Estimation / T.Tang, L.Jiang, P.Zhao, N.Zheng // Sensors. – 2022. – № 22 (19). – P. 7379. DOI: 10.3390/s22197379.

11. Strongest Angle-of-Arrival Estimation for Hybrid Millimeter Wave Architecture with 1-Bit A/D Equipped at Transceivers / R.Li, L.Zhao, C.Liu, M.Bi // *Sensors*. – 2022. – № 22 (9). – P. 3140. DOI: 10.3390/s22093140.

References:

1. Slobodianiuk, P.V., Blahodarnyi, V.H. and Stupak, V.S. (2008), *Dovidnyk z radiomonitorynhu*, in Slobodianiuk, P.V. (ed.), *Aspekt-Polihraf*, Nizhyn, 588 p.
2. Sabibolda, A., Tsyoporenko, V., Tsyoporenko, V. et al. (2022), «Improving the accuracy and performance speed of the digital spectral-correlation method for measuring delay in radio signals and direction finding», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 1 (9) (115), pp. 6–14, doi: 10.15587/1729-4061.2022.252561.
3. Tsyoporenko, V.V. and Tsyoporenko V.H. (2015), «Optymizatsiia bezposhukovoho tsyfrovoho metodu koreliatsiino-interferometrychnoho pelenhuvannia z podviynym koreliatsiynym obroblynniam ta tsyklichnoiu modelliu chastotnoho zsvuvu», *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu, Serii Tekhnichni nauky*, ZhDTU, Zhytomyr, No. 3 (74), pp. 86–95.
4. Tsyoporenko, V.V., Tsyoporenko, V.H. and Andreiev, O.V. (2020), «Otsinka chasovoi efektyvnosti radiopelenhatora, shcho pratsiue na osnovi bezposhukovoho spektralnoho metodu dyspersiino-koreliatsiinoho radiopelenhuvannia», *Tekhnichna inzheneriia*, Derzhavnyi universytet «Zhytomyrska politekhnika», Zhytomyr, No. 1 (85), pp. 184–190.
5. Tsyoporenko, V.V., Tsyoporenko, V.H. and Khomenko, M.F. (2017), «Doslidzhennia shvydkodii bezposhukovoho tsyfrovoho metodu spektralnoho koreliatsiino-interferometrychnoho pelenhuvannia z podviynym koreliatsiynym obroblynniam», *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia (RIU)*, Naukovyi zhurnal Zaporizkoho Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, Serii Radioelektronika ta telekomunikatsii, ZNTU, Zaporizhzhia, No. 3, pp. 28–35, doi: 10.15588/1607-3274-2017-3-3.
6. Tsyoporenko, V.V., Tsyoporenko, V.H. and Nikitchuk, T.M. (2019), «Optymizatsiia bezposhukovoho tsyfrovoho metodu koreliatsiino-interferometrychnoho pelenhuvannia z rekonstruiuvanniam prostorovoho analitychnoho syhnalu», *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia (RIU)*, Naukovyi zhurnal Zaporizkoho Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, Serii Radioelektronika ta telekomunikatsii, ZNTU, Zaporizhzhia, No. 3, pp. 15–24, doi: 10.15588/1607-3274-2019-3-2.
7. Liu, H., Chen, J., Liang, X. and Jin, R. (2022), «A Compensation Method of Nonideal Modulation Pulse for Direction Finding With Time-Modulated Array», *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, No. 21 (8), pp. 1577–1581, doi: 10.1109/LAWP.2022.3174424.
8. Jiang, X., Ni, G., Cao, A. et al. (2021), «Single-Channel Spatial Spectrum Estimation Direction Finding by the Time-Modulated Linear Array», *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, No. 20 (12), pp. 2491–2495, doi: 10.1109/LAWP.2021.3115826.
9. Ni, G., He, C., Liu, Y. et al. (2020), «Direction-Finding Based on Time-Modulated Array Without Sampling Synchronization», *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, No. 19 (12), P. 2149–2153, doi: 10.1109/LAWP.2020.3025328.
10. Tang, T., Jiang, L., Zhao, P. and Zheng, N. (2022), «Coordinated Positioning Method for Shortwave Anti-Multipath Based on Bayesian Estimation», *Sensors*, No. 22 (19), P. 7379, doi: 10.3390/s22197379.
11. Li, R., Zhao, L., Liu, C. and Bi, M. (2022), «Strongest Angle-of-Arrival Estimation for Hybrid Millimeter Wave Architecture with 1-Bit A/D Equipped at Transceivers», *Sensors*, No. 22 (9), P. 3140, doi: 10.3390/s22093140.

Ципоренко Віталій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0001-8559-006X>

Наукові інтереси:

- радіомоніторинг;
- цифрова обробка сигналів.

E-mail: krt_cvv@ztu.edu.ua

Ципоренко Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-6843-8960>

Наукові інтереси:

- радіомоніторинг;
- цифрова обробка сигналів.

E-mail: org_tsvg@ztu.edu.ua

Чухов Владислав Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0001-7782-9077>

Наукові інтереси:

- обробка НВЧ сигналів;
- радіовимірювання в НВЧ.

E-mail: mps_cvv@ztu.edu.ua

Tsyorenko V.V., Tsyorenko V.G., Chukhov V.V.

**Experimental study of the accuracy of searchless methods
of spectral correlation-interferometric radio direction finding**

The experimental assessment of direction finding error for searchless methods of spectral correlation-interferometric radio direction finding was performed. The results of experimental studies on a laboratory model agree with the results of theoretical studies and confirm the workability and effectiveness of the developed radio direction finding methods. The experimental error of bearing estimation lies within (0.25-0.8) degrees for a two-element antenna array and is 0.1 degrees for the bearing method with a 16-element antenna array. It is somewhat more methodical errors of bearing estimation, which, taking into account the error of the analog-to-digital converter (ADC), is consistent with the theory. In general, the accuracy of the researched methods is almost the same compared to the classic ones, with a much faster performance of the developed searchless methods of correlation-interferometric direction finding.

The accuracy of delay determination, and accordingly radio direction finding, is determined by the signal-to-noise ratio, including interference in communication lines, analog-to-digital conversion noise, and the discreteness of delay determination. Taking into account the small 8-bit resolution of the laboratory ADC and the 32-bit digital spectrum analysis and processing device, the main influence on the overall noise level of the layout is caused by interference in the communication lines and the quantization noise of the ADC. The speed of radio direction finding is determined by the required number of signal delay time measurement cycles. At the same time, the investigated searchless methods of correlation-interferometric radio direction finding have one cycle of determining the mutual correlation function, and the known compensatory methods of correlation-interferometric direction finding have thousands of cycles of such estimation, which in general leads to a gain in speed of the studied methods by more than an order of magnitude.

Keywords: correlation-interferometric direction finder; searchless method; experimental assessment of accuracy.

Стаття надійшла до редакції 14.08.2023.