

**В.В. Ципоренко, к.т.н., доц.****В.Г. Ципоренко, к.т.н., доц.****О.В. Андрєєв, к.т.н., доц.****В.В. Чухов, к.т.н., доц.***Житомирський державний технологічний університет*

## **Аналіз швидкодії безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з двовимірним кореляційним обробленням просторового сигналу**

*На сьогодні пеленгування радіоелектронних засобів здійснюється в умовах складної електромагнітної обстановки, що швидко змінюється – з багатопроменевим поширенням радіовипромінювань, перекриванням за частотою корисного сигналу і завад, апріорною невизначеністю щодо параметрів радіовипромінювань. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для вказаних умов є використання цифрових ширококутових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з антенною решіткою та цифровим синтезом її діаграми спрямованості. Недоліками відомих методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування є неможливість пеленгування джерел ширококутових радіовипромінювань у реальному масштабі часу або необхідність застосування багатоканального корелятора з великими апаратними витратами, а також низька точність пеленгування джерел радіовипромінювань, спектри яких повністю перекриваються за частотою. Тому розробка безпошукових цифрових методів ширококутового кореляційно-інтерферометричного пеленгування з використанням антенної решітки, що мають високу точність та можливість попередньої просторової селекції, а також їх дослідження є актуальною задачею.*

*Виконано аналітичну оцінку загальної тривалості обробки сигналів, швидкодії та відносної часової ефективності безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з двовимірним кореляційним обробленням просторового сигналу.*

*В результаті моделювання визначено, що за умов мінімальних апаратних витрат досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує одночасне пеленгування в реальному масштабі часу радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з шириною до 60 МГц при високій щільності спектрів сигналів та з шириною до 150 МГц при середній щільності спектрів сигналів. Досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність, що перевищує 100 разів, порівняно з відомих цифровим спектральним кореляційним методом пеленгування з використанням кільцевої антенної решітки. При цьому швидкодія пеленгування становить 10 тисяч пеленгів за секунду.*

**Ключові слова:** *кореляційно-інтерферометричний пеленгатор; безпошуковий метод; аналіз швидкодії пеленгування; радіопеленгатор.*

**Постановка проблеми.** На сьогодні пеленгування радіоелектронних засобів здійснюється в умовах складної електромагнітної обстановки (ЕМО), що швидко змінюється – з багатопроменевим поширенням радіовипромінювань, перекриванням за частотою корисного сигналу і завад, апріорною невизначеністю щодо параметрів радіовипромінювань. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для вказаних умов є використання цифрових ширококутових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з антенною решіткою (АР) та цифровим синтезом її діаграми спрямованості (ДС) [1, 2]. Недоліками відомих методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування є неможливість пеленгування джерел ширококутових радіовипромінювань у реальному масштабі часу або необхідність застосування багатоканального корелятора з великими апаратними витратами, а також низька точність пеленгування джерел радіовипромінювань (ДРВ), спектри яких повністю перекриваються за частотою. Тому розробка безпошукових цифрових методів ширококутового кореляційно-інтерферометричного пеленгування з використанням АР, що мають високу точність та можливість попередньої просторової селекції, а також їх дослідження є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [3] виконано розробку безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з використанням АР та двовимірним кореляційним обробленням реконструйованого комплексного просторового сигналу. Запропонований метод за рахунок паралельної просторової селекції суміші сигналів, реконструювання комплексного просторового аналітичного сигналу та використання дисперсійно-кореляційного оброблення просторових масивів відгуків, що потрапили до однієї просторової пелюстки, здійснює в реальному масштабі часу безпошукову оцінку напрямків на ДРВ, спектри яких повністю перекриваються за частотою.

В роботах [4–6] виконано дослідження цифрових кореляційно-інтерферометричних методів та засобів пеленгування, що реалізують дискретне пошукове визначення напрямку на ДРВ шляхом обробки часових реалізацій прийнятих випромінювань. Визначено алгоритми, побудова та їх точнісні характеристики. Однак вказані методи використовують послідовний дискретний пошук екстремальної затримки, що визначає їх відносно низьку швидкодію і точність.

У роботі [7] досліджено пошуковий кореляційно-інтерферометричний метод оцінки напрямку на ДРВ з використанням АР, який ефективно реалізується в цифровій формі. Цей метод використовує багатоітераційний компенсаційний алгоритм оцінки затримки прийому радіовипромінювання рознесеними у просторі пеленгаційними каналами. Це зумовлює низьку швидкодію пеленгування.

Аналіз швидкодії пеленгаторів з використанням розглянутих методів пеленгування не проведено.

**Мета дослідження.** Метою роботи є аналіз швидкодії безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з двовимірним кореляційним обробленням просторового сигналу.

**Викладення основного матеріалу.** Виконаємо аналіз швидкодії радіопеленгатора з мінімальними апаратними витратами, що працює, згідно з безпошуковим цифровим методом кореляційно-інтерферометричного пеленгування з двовимірним кореляційним обробленням реконструйованого комплексного просторового сигналу [3], за умови складної ЕМО, що характеризується перекриванням за частотою одночасно прийнятих  $Z$ -канальною лінійною АР суміш  $U_z(t)$  з  $L$  радіовипромінювань:

$$U_z(t) = \sum_{l=0}^{L-1} S_{z,l}(t - \tau_{z,l}) + n_z(t); \quad (1)$$

де  $U_z(t)$  – суміш, прийнята  $z$ -м пеленгаційним каналом;

$S_{z,l}(t - \tau_{z,l})$  –  $l$ -й корисний сигнал прийнятий  $z$ -м пеленгаційним каналом;

$l = 0, 1, \dots, (L-1)$  – кількість корисних сигналів прийнятих в суміші  $U_z(t)$ ;

$\tau_{z,l}$  – час затримки прийому  $l$ -го сигналу  $z$ -м пеленгаційним каналом відносно опорного каналу;

$n_z(t)$  – власний адитивний Гаусів шум з нормальним законом розподілу густини потужності за частотою  $\omega$  в смузі одночасного аналізу  $z$ -го каналу.

Для аналізу швидкодії оцінимо часові витрати  $T_D$  на оброблення прийнятої суміші  $U_z(t)$  радіовипромінювань у смузі  $\Delta F_R$  пропускання приймача радіопеленгатора.

Структурну схему досліджуваного пеленгатора зображено на рисунку 1.

Особливостями роботи пеленгатора рисунку 1 є наступне. Суміш радіовипромінювань приймається  $Z$ -канальною лінійною АР, канали якої попарно послідовно у часі комутуються до двоканального радіоприймача зі спільним гетеродином. На проміжній частоті впродовж певного часу аналізу  $T_a$  суміш  $U_z(t)$  за допомогою двоканального аналого-цифрового перетворювача (АЦП) перетворюється у цифрову форму з частотою дискретизації  $F_d = 2\Delta F_R$ . При цьому накопичують  $(Z-1)$  масивів по  $N_s = T_a \cdot F_d$  відліків прийнятої суміші  $U_z(t)$  радіовипромінювань. Оброблення  $(Z-1)$  масивів відліків виконується на електронно-обчислювальній машині (ЕОМ), що в цілому забезпечує мінімум апаратних витрат.

Оцінка напрямків  $\hat{\theta}_l$  на ДРВ у досліджуваному пеленгаторі здійснюється таким чином [3]:

$$\hat{\theta}_l = \arccos[\hat{\Omega}_l \cdot c / \omega_{s,l}]; \quad (2)$$

$$\text{де } \hat{\Omega}_l = \frac{1}{\Delta z \cdot d} \arctg \left[ \frac{\sum_{k=k_{L,l}}^{k_{H,l}} U_{vk,l}(\Omega_p) \cdot \sin(\Delta \Psi_{Ak,l}(\Delta z, \Omega_p) \cdot K_{\gamma,l}(\omega_{s,k}))}{\sum_{k=k_{L,l}}^{k_{H,l}} U_{vk,l}(\Omega_p) \cdot \cos(\Delta \Psi_{Ak,l}(\Delta z, \Omega_p) \cdot K_{\gamma,l}(\omega_{s,k}))} \right] + v \cdot \pi - \text{оцінка частотного просторового}$$

зсуву сигнальної групи для  $l$ -го сигналу;

$\Delta z \cdot d$  – просторовий зсув у межах апертури АР;

$d$  – відстань між елементами АР;

$U_{vk,l}(\Omega_p)$  – модуль  $k$ -ї частотної складової комплексного взаємного просторового (отриманого в результаті обробки просторової реалізації) спектра  $U_{vk,l}(j\Omega_p)$  сигналу  $S_l(t)$ , прийнятого лінійною АР з багатопелюстковою ДС;

$\Omega_p = 2\pi \cdot p / d \cdot Z$  – значення просторової частоти, що визначає напрямок  $p$ -ї пелюстки ДС,  $p = 0, 1, \dots, (Z-1)$ ;

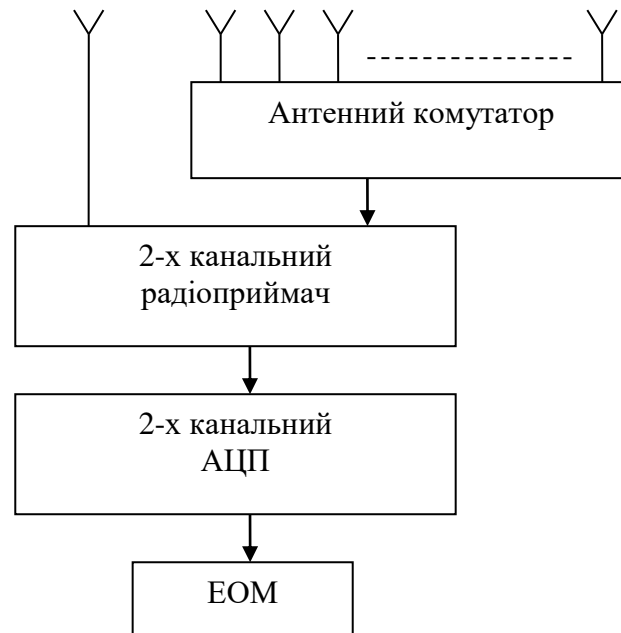


Рис. 1. Структурна схема досліджуваного пеленгатора

$\Delta\hat{\Psi}_{Ak,l}(\Delta z, \Omega_p)$  – оцінка фазового зсуву просторового аналітичного сигналу на відстані  $\Delta z \cdot d$ ;

$K_{\gamma,l}(\omega_{S,k}) = \omega_{L,l} / \omega_{S,k}$  – коефіцієнт дисперсійного вирівнювання фази для  $l$ -го сигналу;

$\omega_{L,l}$ ,  $\omega_{S,k}$  – нижня та  $k$ -та частоти спектра  $U_{z,l}(j\omega_{S,k})$  прийнятої суміші в межах  $l$ -ї смуги одночасного аналізу на робочій частоті, відповідно;

$k_{L,l}$ ,  $k_{H,l}$  – номери нижньої та верхньої частот спектра  $U_{z,l}(j\omega_{S,k})$  прийнятої суміші в межах  $l$ -ї смуги одночасного аналізу на робочій частоті, відповідно;

$c$  – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі;

$\nu$  – коефіцієнт корекції неоднозначності функції  $\arctg(\cdot)$ :  $\nu = 0$  при  $\cos(\Delta\phi) \geq 0$ ;  $\nu = -1$  при  $\cos(\Delta\phi) < 0$ .

Особливістю алгоритму оброблення (2) прийнятих радіовипромінювань  $U_z(t)$  є використання алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Оскільки основною операцією, що виконується при такій реалізації кореляційно-інтерферометричного пеленгування є множення з накопичуванням [8], то тривалість пеленгування доцільно оцінювати через загальну кількість операцій множення з накопичуванням, що необхідно виконати для оцінок пеленгу прийнятих  $L$  випромінювань. Швидкодію пеленгування будемо оцінювати через кількість пеленгів  $N_\theta$ , яку можна отримати за секунду при заданій тривалості процесу аналізу  $T_a$ .

Тривалість виконання ШПФ та кореляційного аналізу доцільно визначати через кількість операцій комплексного множення [1, 8]. У результаті для оцінки  $L$  пеленгів сумарні часові витрати  $T_p$  складаються з витрат часового спектрального аналізу  $T_{SA}$  прийнятої та дискретизованої суміші  $U_z(t_n)$  радіовипромінювань, що виконується в кожному із  $Z$  каналів, просторового спектрального аналізу  $T_{SSA}$  для  $k$  масивів  $\{U_{N_s}(j\omega_{IF,k})\}$  часових спектральних складових однакової частоти, утворених з прийнятих сумішей  $U_z(j\omega_{IF,k})$  на проміжній частоті  $\omega_{IF,k}$ ,  $k \in [0; 0,5 \cdot N_s - 1]$ , що еквівалентний здійсненню паралельної просторової селекції за допомогою синтезу багатопелюсткової ДС, а також витрат  $T_R$  на реконструювання просторового аналітичного сигналу та його кореляційне оброблення, що здійснюється для кожного  $l$ -го просторово відселектованого з прийнятої суміші сигналу, витрат  $T_{DP}$  на оцінку значень просторових частот  $\hat{\Omega}_{S,p}$  сигналів прийнятої суміші з використанням дисперсійно-кореляційного оброблення:

$$T_p = T_{SA} + T_{SSA} + T_R + T_{DP}; \quad (3)$$

Для мінімізації часових витрат часового спектрального аналізу його доцільно реалізувати на основі швидких алгоритмів, наприклад, алгоритму ШПФ [8]. У цьому випадку тривалість  $T_{SA}$  часового спектрального аналізу, що виконується попарно послідовно для  $Z$  радіоканалів дорівнює:

$$T_{SA} = 2 \cdot (Z - 1) \cdot (N_S \cdot \log_2 N_S) \cdot T_1; \quad (4)$$

де  $T_1$  – тривалість однієї операції комплексного множення з накопичуванням.

Часові витрати просторового спектрального аналізу  $T_{SSA}$  мінімізуються за умови використання також швидких алгоритмів, наприклад, ШПФ і необхідності формування лише однієї  $Z$ -пелюсткової ДС для просторового аналізу  $N_S/2$  спектральних складових прийнятої суміші  $U_z(t_n)$  радіовипромінювань, та дорівнюють:

$$T_{SSA} = 0,5 \cdot N_S \cdot Z \cdot \log_2 Z \cdot T_1; \quad (5)$$

Для визначення часових витрат  $T_R$  та  $T_{DP}$ , врахуємо кількість  $M_S$  складових виокремлених підмасивів, що містять складову з екстремальною частотою  $\Omega_p^*$  гармонічного сигналу. При використанні, наприклад, вікна Блекмана для просторового спектрального аналізу  $M_S = 6$ .

Таким чином, часові витрати  $T_R$  дорівнюють:

$$T_R = 0,5 \cdot N_S \cdot M \cdot \Delta F_R \cdot M_S \cdot 3 \cdot T_1 = 9 \cdot N_S \cdot M \cdot \Delta F_R \cdot T_1; \quad (6)$$

де  $M = L / \Delta F_R$  – середня щільність радіовипромінювань за частотою.

Часові витрати  $T_{DP}$ , з урахуванням (4), дорівнюють:

$$T_{DP} = M \cdot 0,5 \cdot N_S \cdot 6 \cdot \Delta F_R \cdot T_1; \quad (7)$$

Таким чином, загальні часові витрати  $T_p$  на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів, згідно з безпощуковим цифровим методом кореляційно-інтерферометричного пеленгування з двовимірним кореляційним обробленням реконструйованого комплексного просторового сигналу, з урахуванням рівнянь (3) – (7), дорівнюють:

$$\begin{aligned} T_p &= 2 \cdot (Z - 1) \cdot (N_S \cdot \log_2 N_S) \cdot T_1 + 0,5 \cdot N_S \cdot Z \cdot \log_2 Z \cdot T_1 + \\ &+ 9 \cdot N_S \cdot M \cdot T_1 + M \cdot 0,5 \cdot N_S \cdot 6 \cdot \Delta F_R \cdot T_1 = \quad ; \quad (8) \\ &= N_S \cdot T_1 \cdot (2 \cdot (Z - 1) \cdot \log_2 N_S + 0,5 \cdot Z \cdot \log_2 Z + 12 \cdot M \cdot \Delta F_R) \end{aligned}$$

Швидкодія пеленгування  $N_{\theta, \max}$  має визначатися за умови оброблення прийнятої суміші радіовипромінювань у реальному масштабі часу тобто при  $T_p < T_a$  таким чином:

$$N_{\theta, \max} = M \cdot \Delta F_R / T_a. \quad (9)$$

Для прикладу, для типових умов [1, 2] ЕМО при пеленгуванні у реальному масштабі часу та при  $M \cdot \Delta F_R = 10$ , тривалості процесу аналізу  $T_a = 1 \cdot 10^{-3} c$  забезпечується максимальна швидкодія  $N_{\theta, \max} = M \cdot \Delta F_R / T_a = 10 / 10^{-3} = 10^4$  пеленгів / с.

Проведемо, з урахуванням рівняння (8), дослідження залежності загальних часових витрат  $T_p$  від ширини смуги пропускання радіопеленгатора  $\Delta F_R$  та середньої щільності радіовипромінювань  $M$  за частотою для таких типових початкових умов: значення проміжної частоти  $f_{IF} = 10,7 MГц$ ; частота дискретизації  $F_d$ , вибрана, згідно з теоремою відліків:  $F_d = 2 \cdot (f_{IF} + 0,5 \cdot \Delta F_R)$ ; тривалість процесу аналізу в кожному пеленгаційному радіоканалі  $T_a = 1 \cdot 10^{-3} c$ ; кількість часових сигнальних відліків визначається, згідно з рівнянням:  $N_S = T_a \cdot F_d$ ;  $M_1 = 1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{Гц}$ ,  $M_2 = 5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{Гц}$ ; вікно спектрального аналізу – Блекмана, що забезпечує рівень бічних пелюсток  $-58 Дб$  для якого  $M_S = 6$ . Дослідження проведемо для умови, що цифрове оброблення сигналів буде виконуватись з використанням ноутбука середньої обчислювальної продуктивності, який має  $T_1 = 0,1 \cdot 10^{-9} c$  при перемножуванні 32-розрядних комплексних чисел, що у 10 разів менша ніж для сучасного сигнального процесора [8, 9].

Отримане сімейство залежностей загальних часових витрат  $T_p$  від ширини смуги пропускання радіопеленгатора  $\Delta F_R, [MГц]$  (позначено  $\Delta$ ) для значень  $M_1 = 1 \cdot 10^{-6} [1/Гц]$  (лінія  $T_{p2}$ ),  $M_2 = 5 \cdot 10^{-6} [1/Гц]$  (лінія  $T_{p3}$ ) при  $Z = 64$  наведено на рисунку 2. Лінія  $64T_a$  показує тривалість аналізу (прийому) суміші радіовипромінювань на вході пеленгатора.

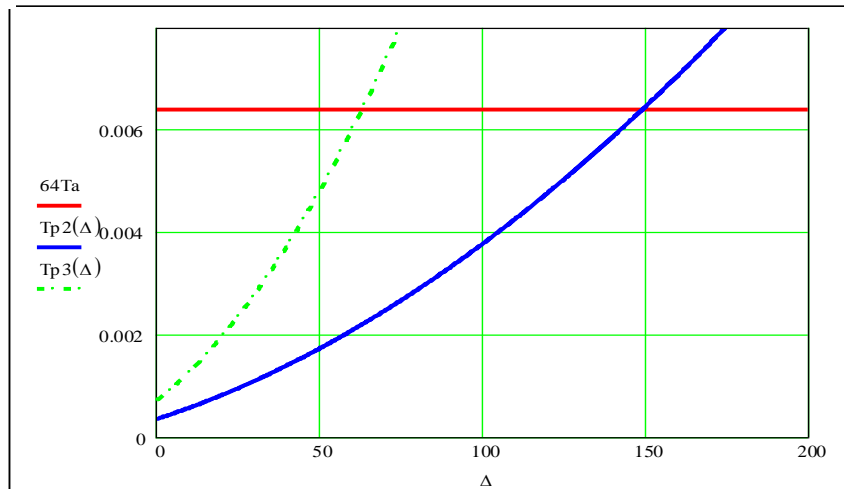


Рис. 2. Сімейство залежностей загальних часових витрат  $T_p$  від ширини смуги  $\Delta F_R$  пропускання радіопеленгатора при  $M_1 = 1 \cdot 10^{-6} (1 / \text{Hz})$  – суцільна лінія,  $M_2 = 5 \cdot 10^{-6} (1 / \text{Hz})$  – штрихова лінія

Аналіз рисунку 2 показує, що загальні часові витрати  $T_p$  на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів, згідно з алгоритмом (2), менші за тривалість  $T_a$  процесу аналізу при  $\Delta F_R \leq 60 \text{MHz}$  для  $M_2 = 5 \cdot 10^{-6} (1 / \text{Hz})$  – при високій щільності спектрів сигналів, та  $\Delta F_R \leq 150 \text{MHz}$  для  $M_1 = 1 \cdot 10^{-6} (1 / \text{Hz})$  – при середній щільності спектрів сигналів. Таким чином, для пеленгування в реальному масштабі часу може бути використаний радіоприймач з шириною смуги пропускання щонайменше до  $60 \text{MHz}$ .

Виконаємо дослідження відносної часової ефективності  $\mu_T$  реалізації безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з двовимірним кореляційним обробленням реконструйованого комплексного просторового сигналу, порівняно з відомим цифровим кореляційним методом пеленгування з використанням AP, що також використовує цифрові методи спектрального аналізу [2, 10].

Відмінністю відомих методів пеленгування є послідовне покрокове сканування простору головною пелюсткою ДС з кількістю кроків  $(D_\theta / h_\theta)$ , де  $h_\theta$  – дискретність просторового кореляційного аналізу та використання пошукового кореляційного аналізу, що виконує перемноження  $N_S$  спектральних відліків двох сигналів. З урахуванням цього загальні часові витрати  $T_V$  відомого цифрового кореляційного методу пеленгування з використанням  $Z$ -елементної кільцевої AP дорівнюють:

$$T_V = N_S \cdot T_1 \cdot (Z \cdot \log_2 N_S + 1,5 \cdot Z \cdot (D_\theta / h_\theta)). \quad (10)$$

Аналіз рівняння (10) показує, що часові витрати  $T_V$  суттєво залежать від дискретності  $h_\theta$  просторового кореляційного аналізу можливих напрямків на ДРВ. Цей фактор зумовлює велику тривалість оброблення та загальні часові витрати  $T_V > T_a$ , що робить неможливим пеленгування у реальному масштабі часу з високою точністю за умови застосування одного сигнального процесора типу TMS320. Можливе також суттєве збільшення дискретності оцінки пеленгу  $h_\theta$ , що погіршує точність пеленгування, або застосування багатопроцесорної схеми оброблення, що суттєво збільшує вартість пеленгатора.

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

У результаті відносна часова ефективність  $\mu_T$  безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з двовимірним кореляційним обробленням реконструйованого комплексного просторового сигналу, з урахуванням (8) та (10), визначається, згідно з рівнянням:

$$\mu_T = \frac{T_V}{T_p} \approx \frac{Z \cdot \log_2 N_S + 1,5 \cdot Z \cdot (D_\theta / h_\theta)}{Z \cdot \log_2 N_S + 0,5 \cdot Z \cdot \log_2 Z + 12 \cdot M}. \quad (11)$$

Аналіз рівняння (11) показує, що оскільки  $(D_\theta / h_\theta) \gg Z$ , то  $\mu_T \gg 1$ , що підтверджує високу ефективність досліджуваного методу пеленгування.

Проведемо дослідження залежності відносної часової ефективності  $\mu_T$  від ширини смуги  $\Delta F_R$  (позначено  $\Delta$ ) при  $D_\theta = 360^\circ$ ;  $h_\theta = 0,1^\circ$ ;  $Z = 64$ ;  $T_a = 1 \cdot 10^{-3} \text{c}$ ;  $M = 10$ . Отримані залежності, згідно з рівнянням (11), для різних значень  $M$  щільності спектрів сигналів наведено на рисунку 3.

Аналіз залежностей на рисунку 3 показує, що відносна часова ефективність  $\mu_T$  відповідного запропонованого пеленгатора обернено пропорційна ширині смуги  $\Delta F_R$ , та перевищує 100 разів при  $\Delta F_R < 25 \text{ MHz}$  для  $M_2 = 5 \cdot 10^{-6} (1/\text{Hz})$  – при високій щільності спектрів сигналів. Для  $M_1 = 1 \cdot 10^{-6} (1/\text{Hz})$  – при середній щільності спектрів сигналів відносна часова ефективність  $\mu_T$  перевищує 100 разів при  $\Delta F_R < 130 \text{ MHz}$ .

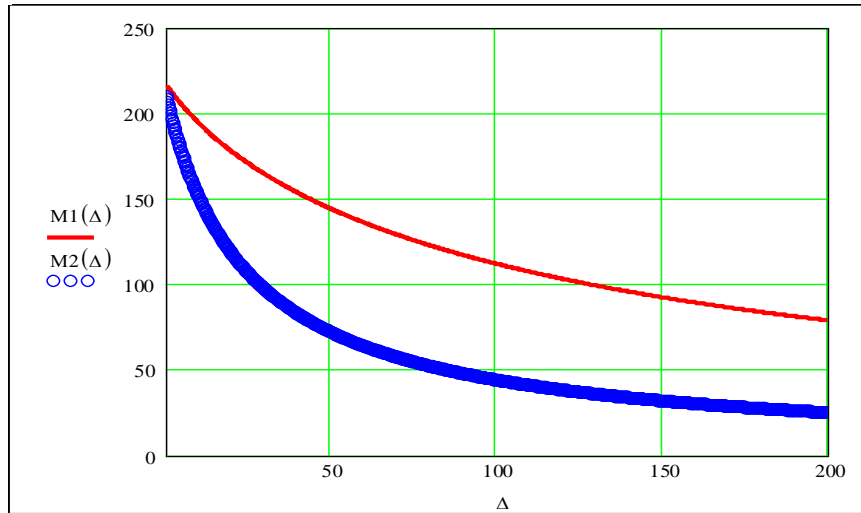


Рис. 3. Залежність відносної часової ефективності  $\mu_T$  від ширини смуги  $\Delta F_R$  при кількості пеленгаційних каналів  $Z = 64$

Таким чином, виконані дослідження швидкодії показали, що досліджений безпошуковий метод пеленгування за умов складної ЕМО забезпечує одночасне пеленгування всіх радіовипромінювань, що потрапляють у смугу частот одночасного аналізу з шириною до  $60 \text{ MHz}$  у реальному масштабі часу, має високу відносну часову ефективність  $\mu_T$ , що перевищує 100 разів, порівняно з відомим цифровим спектральним кореляційним методом пеленгування з використанням АР. При цьому швидкодія пеленгування становить  $N_{\theta, \max} = M \cdot \Delta F_R / T_a = 10 / 10^{-3} = 10^4$  пеленгів / с.

**Висновки.** Виконано оцінку загальних часових витрат  $T_p$ , швидкодії  $N_{\theta, \max}$  та відносної часової ефективності  $\mu_T$  безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з двовимірним кореляційним обробленням реконструйованого комплексного просторового сигналу. За умов мінімальних апаратних витрат визначено, що досліджений безпошуковий метод пеленгування за умов складної ЕМО забезпечує одночасне пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють у смугу частот одночасного аналізу з шириною до  $60 \text{ MHz}$  у реальному масштабі часу. Досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність  $\mu_T$ , що перевищує 100 разів, порівняно з відомим цифровим спектральним кореляційним методом пеленгування з використанням кільцевої АР.

У подальшому доцільно виконати дослідження точності та оптимізацію параметрів алгоритму пеленгування.

#### Список використаної 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 радіомониторингу / П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарний, В.С. Ступак ; під ред. П.В. Слободянюка. – Ніжин : Вид-во «Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.
3. Tsyporenko V.V. Development of direct method of direction finding with two-dimensional correlative processing of spatial signal / V.V. Tsyporenko, V.G. Tsyporenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series : Information and controlling system. – 2016. – Vol. 6, No. 9 (84). – Pp. 63–70. DOI : <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85599>.
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. – Pp. 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 // Proc. of the 12-th International Conference Signal Processing (ICSP). – 2014. – 19–23, Oct. – Pp. 52–57. DOI : 10.1109/ICOSP.2014.7014968.
6. Gaoming H. Time-delay direction finding based on canonical correlation analysis / H.Gaoming, Y.Luxi, He Zhenya // Proc. of the IEEE International Symposium Circuits and Systems (ISCAS). – 2015. – 23–26, May. – Pp. 540–549.

7. Bondarenko M.V. Direction-finding accuracy of the linear digital array under jitter conditions / M.V. Bondarenko // Proceedings of the 21-th International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo). – 2011. – 12–16, Sept. – Pp. 1128–1129.
8. Proakis J.G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications / J.G. Proakis, D.G. Manolakis. – 4-th ed. – New Jersey : Prentice-Hall, Inc. : Upper Saddle River, 2006. – 1077 p.
9. Multicore Fixed and Floating-Point Digital Signal Processor TMS320C6678 : сайт фірми-виробника : [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ti.com/product/tms320c6678>.
10. Дрогалін В.В. Алгоритми оцінювання кутових координат джерел випромінювання, засновані на методах спектрального аналізу / В.В. Дрогалін, В.І. Меркулов, В.А. Радзивілов // Успехи сучасної радіоелектроніки. – 1998. – № 2. – С. 3–17.

**References:**

1. Rembovskij, A.M., Ashihmin, A.V. and Koz'min, V.A. (2010), *Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva*, in Rembovskij, A.M. (ed.), 2nd ed., pererab. i dop., Gorjachaja liniya, Telekom, Moskva, 624 p.
2. Slobodjanjuk, P.V., Blagodarnyj, V.G. and Stupak, V.S. (2008), *Dovidnyk z radiomonitoringu*, in Slobodjanjuk, P.V. (ed.), Vyd-vo «Aspekt-Poligraf», Nizhyn, 588 p.
3. Tsyoporenko, V.V. and Tsyoporenko, V.G. (2016), «Development of direct method of direction finding with two-dimensional correlative processing of spatial signal», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Series Information and controlling system*, Vol. 6, No. 9 (84), pp. 63–70, available at: DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85599>
4. Jung-Hoon, L. and Jong-Myung, W. (2014), «Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations», *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 14, pp. 719–722, available at: DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Jian, Y., Wangjie, C., Lei, L. and Xiaokang, N. (2014), «Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source», *Proc. of the 12-th International Conference Signal Processing (ICSP)*, from 19–23 Oct., pp. 52–57, available at: DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Gaoming, H., Luxi, Y. and Zhenya, He (2015), «Time-delay direction finding based on canonical correlation analysis», *Proc. of the IEEE International Symposium Circuits and Systems (ISCAS)*, from 23–26 May, pp. 540–549.
7. Bondarenko, M.V. (2011), «Direction-finding accuracy of the linear digital array under jitter conditions», *Proceedings of the 21-th International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)*, from 12–16 Sept., pp. 1128–1129.
8. Proakis, J.G. and Manolakis, D.G. (2006), «Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications», 4<sup>th</sup> ed., Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1077 p.
9. [www.ti.com](http://www.ti.com), «Multicore Fixed and Floating-Point Digital Signal Processor TMS320C6678», сайт фірми-виробника, [On-line], available at: <http://www.ti.com/product/tms320c6678>
10. Drogalin, V.V., Merkulov, V.I. and Radzivilov, V.A. (1998), «Algoritmy ocenivaniya uglovykh koordinat istochnikov izlucheniya, osnovannye na metodah spektral'nogo analiza», *Uspehi sovremennoj radiojelektroniki*, No. 2, pp. 3–17.

**Ципоренко** Віталій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- алгоритми радіопеленгування;
- спектральний аналіз.

E-mail: [tsyoporenko.1985@gmail.com](mailto:tsyoporenko.1985@gmail.com).

**Ципоренко** Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- алгоритми виявлення, оцінки параметрів та радіопеленгування;
- спектральний аналіз.

E-mail: [tsyoprenkovg@gmail.com](mailto:tsyoprenkovg@gmail.com).

**Чухов** Владислав Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- техніка НВЧ;
- оцінка параметрів НВЧ сигналів.

E-mail: [mps\\_cvv@ukr.net](mailto:mps_cvv@ukr.net).

**Андрєєв** Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- алгоритми обробки сигналів штучних супутників землі;
- оцінка параметрів сигналів.

E-mail: [oleks.andreyev@gmail.com](mailto:oleks.andreyev@gmail.com).

Стаття надійшла до редакції 10.04.2018.