

В.В. Ципоренко, к.т.н., доц.

В.Г. Ципоренко, к.т.н., доц.

О.В. Андрєєв, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

### Оцінка часової ефективності радіопеленгатора, що працює на основі безошукового спектрального методу дисперсійно-кореляційного радіопеленгування

На сьогодні в автоматизованих системах радіомоніторингу пеленгування радіоелектронних засобів здійснюється в умовах складної електромагнітної обстановки, великої апріорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах реального масштабу часу реалізації. Перспективним напрямом для вказаних умов є використання широкосмугових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів із застосуванням цифрового оброблення комплексних спектрів прийнятої суміші радіовипромінювань.

Виконано аналітичну оцінку сумарних часових витрат радіопеленгатора, що працює відповідно до безошукового спектрального методу дисперсійно-кореляційного радіопеленгування. Проведено дослідження залежності відносної часової ефективності від ширини смуги пропускання радіоприймача пеленгатора. В результаті моделювання визначено, що за умов мінімальних апаратних витрат, тобто під час використання одноканальної системи обробки даних, досліджений безошуковий метод пеленгування в реальному масштабі часу забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють у смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 250 МГц. Порівняльний аналіз показав, що досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність, яка в 45 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування. Визначено також, що для відомого пошукового методу пеленгування суттєве збільшення дискретності оцінки пеленга погіршує точність пеленгування до 1 градуса, а застосування багатопроцесорної схеми оброблення збільшує вартість пеленгатора. Дані дослідження є продовженням роботи з розробки безошукових спектральних методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування.

**Ключові слова:** кореляційно-інтерферометричний метод; безошукове радіопеленгування; часові витрати; часова ефективність.

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

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор.** На сьогодні в мобільних системах радіомоніторингу пеленгування радіоелектронних засобів має здійснюватися в умовах реального масштабу часу реалізації з високою точністю. Перспективним напрямом реалізації пеленгування для вказаних умов є використання кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів [1, 2]. Основною перевагою кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точність пеленгування джерел шумоподібних радіовипромінювань при відношеннях сигнал/шум менше 0 дБ. Це зумовлено можливістю використання ефективних алгоритмів оброблення сигналів в умовах апріорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, ефективної компенсації завад і перевідбитих сигналів, що зумовлені впливом сторонніх об'єктів і елементів АР. Також технологія кореляційно-інтерферометричного пеленгування дає можливість використання різноманітних конфігурацій АР, що дозволяє розширювати робочий сектор пеленгування і збільшувати просторову розрізнювальну здатність. Класично кореляційно-інтерферометричне пеленгування реалізується пошуковим компенсаційним методом з пошуком значення компенсуючої затримки, яке забезпечує максимум взаємної кореляційної функції. Недоліком цього методу є велика обчислювальна складність та неможливість пеленгування джерел радіовипромінювань із розширеним спектром у реальному масштабі часу з високою точністю. Тому дослідження з підвищення швидкодії кореляційно-інтерферометричного пеленгування під час забезпечення високої точності є актуальною задачею.

Результати досліджень кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів описані у багатьох сучасних наукових працях. Наприклад, у [3–5] досліджено пошукові кореляційно-інтерферометричні методи оцінки напряму на ДРВ з використанням АР, які ефективно реалізуються у цифровій формі. Ці

методи використовують багатоітераційний компенсаційний алгоритм оцінки затримки прийому радіовипромінювання рознесеними у просторі пеленгаційними каналами. Це обумовлює низьку швидкодію пеленгування. Запропоновано кореляційний метод пеленгування, що має підвищену точність пеленгування. Однак швидкодія пеленгування та можливість роботи пеленгатора в реальному масштабі часу не досліджена.

У роботі [6] розроблено безпошуковий цифровий метод спектрального дисперсійно-кореляційного радіопеленгування для великої антенної бази. Отримано аналітичні оцінки часу затримки та напрямку на джерело радіовипромінювання прямим методом. Проведено імітаційне моделювання роботи пеленгатора та визначено його точнісні характеристики. Для мінімізації обчислювальних витрат і підвищення швидкодії пеленгування актуальним є подальше його дослідження. В [7] проведено аналіз швидкодії безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з двовимірним кореляційним обробленням просторового сигналу. Оцінено швидкодію пеленгування під час використання лінійної антенної решітки.

У [8–9] досліджено нелінійні спектральні методи пеленгування, які забезпечують високу просторову роздільну здатність прийнятих випромінювань. Такі методи мають низьку 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 апріорної інформації про кількість прийнятих у суміші випромінювань; зміщення оцінок напрямів, що погіршує точність пеленгування; втрата стійкості роботи при низьких (близько 10 дБ) входних відношеннях сигнал/шум. У 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].

Отже, для використання в автоматизованих системах радіомоніторингу розробка та дослідження швидкодії і часової ефективності кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є актуальною задачею. Невирішеною раніше частиною загальної проблеми розробки швидкодіючих кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є дослідження сумарних часових витрат (швидкодії) безпошукового спектрального дисперсійно-кореляційного радіопеленгатора.

**Метою статті** є оцінка сумарних часових витрат та відносної часової ефективності пеленгатора, що працює на основі безпошукового спектрального методу дисперсійно-кореляційного радіопеленгування.

**Викладення основного матеріалу.** Виконаємо аналіз сумарних часових витрат радіопеленгатора з мінімальними апаратними витратами, що працює відповідно до безпошукового спектрального методу дисперсійно-кореляційного радіопеленгування [6].

Нехай у горизонтальній площині з випадкового невідомого напрямку  $\theta$  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 антеною, 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 антеною. Шуми  $n_1(t)$  і  $n_2(t)$  та сигнали  $S_1(t)$  та  $S_2(t)$  є обмеженими смугою  $\Delta F_R$  пропускання радіоприймача пеленгатора. Вихідні умови запишемо таким чином:

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

де  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$  – адитивні суміші сигналів  $S_1(t)$  і  $S_2(t)$  та шумів  $n_1(t)$  і  $n_2(t)$  радіоканалів пеленгатора;

$\tau_s$  – апріорі невідома затримка радіосигналу, що є випадковою величиною;

$T_a$  – час аналізу прийнятих сумішей радіовипромінювань.

Згідно з досліджуваним методом пеленгування оцінка  $\hat{\theta}$  напрямку на ДРВ здійснюється таким чином [1]:

$$\hat{\theta} = \arccos(c \cdot \hat{\tau}_{лз} / d), \quad (2)$$

де  $\hat{\tau}_{лз}$  – оцінка затримки сигналу між двома антенами;

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

Оцінка затримки  $\hat{\tau}_{ЛЗ}$  сигналу між двома антенами виконується згідно з рівнянням [6]:

$$\hat{\tau}_{ЛЗ} = \frac{1}{\omega_H} \arctg \left[ \frac{\sum_{k=k_H}^{k_B} U_1(\omega_k) \cdot U_2(\omega_k) \cdot \sin \left( \frac{(\Delta\varphi_3(\omega_k) + \Delta\varphi_{ц}(\omega_k)) \cdot \omega_H}{\omega_k} \right)}{\sum_{k=k_H}^{k_B} U_1(\omega_k) \cdot U_2(\omega_k) \cdot \cos \left( \frac{(\Delta\varphi_3(\omega_k) + \Delta\varphi_{ц}(\omega_k)) \cdot \omega_H}{\omega_k} \right)} \right] + \nu \cdot \pi, \quad (3)$$

де  $\omega_H$  – значення нижньої частоти спектра сигналу, що пеленгується;

$\omega_k$  –  $k$ -те значення частоти спектральних складових сигналу, що знаходиться в межах діапазону робочих частот  $[\omega_H; \omega_B]$ ;

$U_1(\omega_k) \cdot U_2(\omega_k)$  – амплітуди спектральних складових сигналу, що пеленгується;

$\Delta\varphi_3(\omega_k)$  – значення залишкової частини різницевого фазового спектра;

$\Delta\varphi_{ц}(\omega) = [\omega \cdot \hat{\tau}_{ЛЗ.Г}]_{ц}$  – значення цілої частини різницевого фазового спектра;

$[\cdot]_{ц}$  – операція визначення цілої частини аргументу, що є кратною  $2\pi$  радіан;

$\hat{\tau}_{ЛЗ.Г}$  – наближена оцінка значення компенсуючої затримки.

Наближену оцінку  $\hat{\tau}_{ЛЗ.Г}$  значення компенсуючої затримки можна отримати за формулою [6]:

$$\hat{\tau}_{ЛЗ.Г} = (1/\Delta\omega) \arctg \left[ \frac{\sum_{k=k_H}^{k_B} U_1(\omega_{IF.k}) \cdot U_2(\omega_{IF.k}) \cdot U_1(\omega_{IF.k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF.k} + \Delta\omega) \cdot \sin[\Delta\varphi_{\Delta.k}]}{\sum_{k=k_H}^{k_B} U_1(\omega_{IF.k}) \cdot U_2(\omega_{IF.k}) \cdot U_1(\omega_{IF.k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF.k} + \Delta\omega) \cdot \cos[\Delta\varphi_{\Delta.k}]} \right] + z \cdot \pi, \quad (4)$$

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

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

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

Для аналізу швидкодії радіопеленгатора оцінимо сумарні часові витрати  $T_p$  на оброблення прийнятої суміші  $U_1(t)$  та  $U_2(t)$  радіовипромінювань у смузі  $\Delta F_R$  пропускання приймача радіопеленгатора.

Особливістю алгоритму оброблення прийнятих радіовипромінювань  $U_1(t)$  та  $U_2(t)$  відповідно до рівнянь (2–4) є використання алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Оскільки основною операцією, що виконується під час такої реалізації кореляційно-інтерферометричного пеленгування, є множення комплексних чисел з накопичуванням [10], то сумарні часові витрати  $T_p$  доцільно оцінювати через загальну кількість операцій множення з накопичуванням, що необхідно виконати для оцінки пеленга на ДРВ.

У результаті для оцінки одного пеленга сумарні часові витрати  $T_p = T_{SA} + T_C$  складаються з витрат часового спектрального аналізу  $T_{SA}$  сумішей  $U_1(t)$  та  $U_2(t)$  радіовипромінювань, що виконується на проміжній частоті  $\omega_{IF}$ , та витрат  $T_C$  кореляційного оброблення, що складається з дворазового перемноження комплексних спектрів (4):  $U_1(\omega_{IF.k}) \cdot U_2(\omega_{IF.k})$  та  $U_1(\omega_{IF.k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF.k} + \Delta\omega)$  з множенням отриманих добутків на  $\sin[\Delta\varphi_{\Delta.k}]$  та  $\cos[\Delta\varphi_{\Delta.k}]$ , перемноження комплексних спектрів (3):

$$U_1(\omega_k) \cdot U_2(\omega_k) \text{ з множенням отриманих добутків на } \sin\left(\frac{(\Delta\varphi_3(\omega_k) + \Delta\varphi_H(\omega_k)) \cdot \omega_H}{\omega_k}\right) \text{ та}$$

$$\cos\left(\frac{(\Delta\varphi_3(\omega_k) + \Delta\varphi_H(\omega_k)) \cdot \omega_H}{\omega_k}\right).$$

Для мінімізації часових витрат спектрального аналізу виконаємо його на основі ШПФ. Тоді тривалість  $T_{SA}$  часового спектрального аналізу дорівнює:

$$T_{SA} = 2 \cdot N_s \cdot \log_2 N_s \cdot T_1, \quad (5)$$

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

$N_s$  – кількість часових відліків прийнятих сумішей  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ , що аналізуються.

Часові витрати кореляційного оброблення і перемножування:

$$T_c = (0,5 \cdot N_s \cdot 8) \cdot T_1. \quad (6)$$

Таким чином, загальні часові витрати  $T_p$  на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів згідно з безошуковим спектральним методом дисперсійно-кореляційного радіопеленгування [6] з урахуванням рівнянь (2–6) дорівнюють:

$$T_p = T_1 \cdot (2 \cdot N_s \cdot \log_2 N_s + 4N_s). \quad (7)$$

Для пеленгування в реальному масштабі часу необхідно, щоб  $T_p < T_a$ . Аналіз рівняння (7) показує, що, оскільки  $T_a = N_s \cdot T_d$ , де  $T_d$  – період дискретизації сумішей  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ , що аналізуються, то для забезпечення умови  $T_p \ll T_a$  необхідно, щоб  $T_d \gg 2T_1 \cdot \log_2 N_s + 4$ . Ця умова впливає на обмеження частоти дискретизації  $F_d = 1/T_d$  і відповідно на ширину смуги  $\Delta F_R < F_d / 2$  пропускання радіоприймача пеленгатора.

Виконаємо дослідження відносної часової ефективності  $\mu_T$  реалізації безошукового спектрального методу дисперсійно-кореляційного радіопеленгування порівняно з відомим цифровим кореляційним пошуковим методом пеленгування, що також використовує цифрові методи спектрального аналізу [1, 4, 5].

Відмінністю відомих методів пеленгування є знаходження кореляційної функції з кількістю кроків  $(D_\theta / h_\theta)$  перемножування  $N_s$  спектральних відліків двох сигналів, де  $D_\theta$  – робочий сектор пеленгування,  $h_\theta$  – дискретність просторового кореляційного аналізу. З урахуванням цього загальні часові витрати  $T_v$  відомого цифрового кореляційного методу пеленгування дорівнюють:

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

З рівняння (8) видно, 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  $T_v$  більші за тривалість процесу аналізу  $T_a$ , що робить неможливим пеленгування в реальному масштабі часу з високою точністю за умови застосування одноканальної системи оброблення даних, наприклад, сучасного сигнального процесора типу TMS320C6678. Суттєве збільшення дискретності оцінки пеленга  $h_\theta$  погіршує точність пеленгування, а застосування багатопроцесорної схеми оброблення збільшує вартість пеленгатора. У результаті відносна часова ефективність  $\mu_T$  безошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням з урахуванням (6) та (8) визначається за рівнянням:

$$\mu_T = \frac{T_v}{T_p} = \frac{2 \cdot \log_2 N_s + 0,5 \cdot (D_\theta / h_\theta)}{2 \cdot \log_2 N_s + 4}. \quad (9)$$

Аналіз рівняння (9) показує, що, оскільки практично  $(D_\theta / h_\theta) \approx 360 / 0,1 = 3600$ , а  $\log_2 N_s \approx 12$ , то  $(D_\theta / h_\theta) \gg 2 \cdot \log_2 N_s$ , а  $\mu_T \gg 1$ , що підтверджує високу часову ефективність досліджуваного методу пеленгування.

Виконаємо моделювання. Проведемо з урахуванням рівняння (7) дослідження залежності загальних часових витрат  $T_p$  від ширини смуги пропускання радіопеленгатора  $\Delta F_R$  для таких типових початкових

умов: значення проміжної частоти  $f_{IF} = 10,7$  МГц; частота дискретизації  $F_d$  вибрана за теоремою відліків:  $F_d = 2 \cdot (f_{IF} + 0,5\Delta F_R)$ ; тривалість процесу аналізу в кожному пеленгаційному радіоканалі  $T_a = 10^{-3}$  с; кількість часових сигнальних відліків визначається за рівнянням:  $N_s = T_a \cdot F_d$ ; робочий сектор пеленгування  $D_\theta = 360^\circ$ ; крок оцінки напрямку  $h_\theta = 0,5^\circ$ .

Дослідження проведемо для умови, що цифрове оброблення сигналів буде виконуватися з використанням ноутбука середньої обчислювальної продуктивності, який має  $T_1 = 0,1 \cdot 10^9$  с при перемножуванні 32-розрядних комплексних чисел, що в 10 разів менша ніж для сучасного сигнального процесора типу TMS320 [10, 11].

Отримані згідно з (7) та (8) залежності  $T_p$  від ширини смуги пропускання радіопеленгатора  $\Delta F_R$  [МГц] (позначено  $\Delta$ ) для досліджуваного та відомого методів пеленгування наведено на рисунку 1.

Аналіз рисунка 1 показує, що загальні часові витрати  $T_p$  на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів відповідно до алгоритму (2) менші за тривалість  $T_a$  процесу аналізу при  $\Delta F_R < 250$  МГц, а для відомого пошукового радіопеленгатора при  $\Delta F_R < 25$  МГц під час визначення кореляційної функції з просторовим кроком  $h_\theta = 1^\circ$ . Великий крок оцінки напрямку  $h_\theta = 1^\circ$  спричиняє додаткову методичну похибку пеленгування до  $h_\theta / 2 = 0,5^\circ$ .

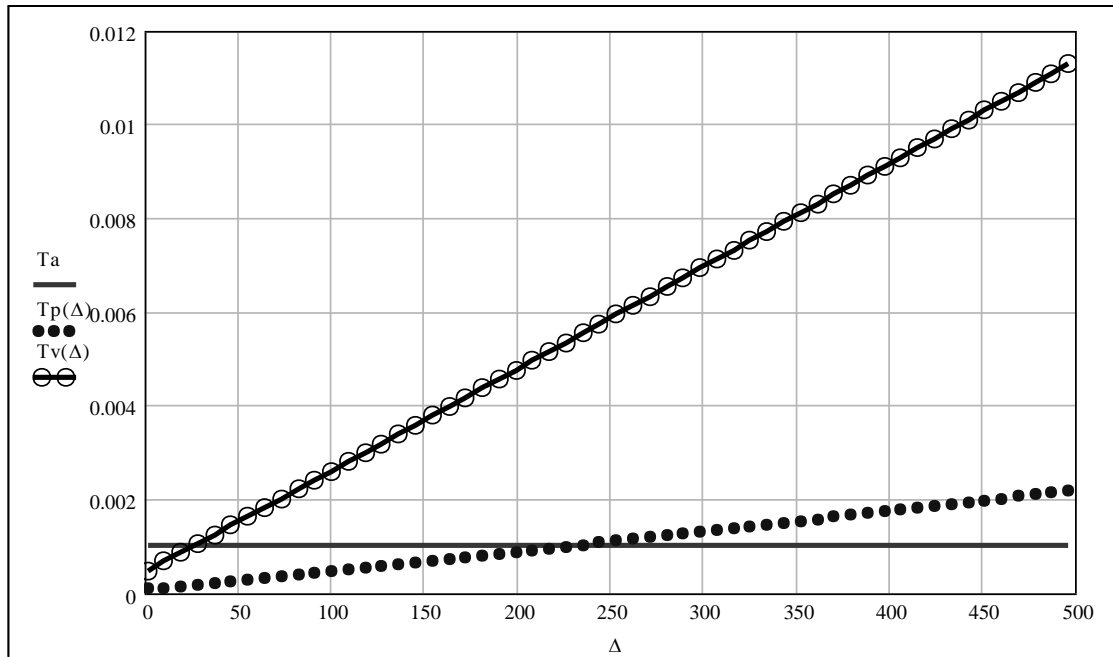


Рис. 1. Залежності загальних часових витрат  $T_p$  досліджуваного та пошукового  $T_v$  радіопеленгаторів від ширини смуги  $\Delta F_R$  пропускання

Отже, для пеленгування згідно з безпошуковим спектральним методом дисперсійно-кореляційного радіопеленгування в реальному масштабі часу може бути використаний радіоприймач з шириною смуги пропускання до 250 МГц та одноканальною системою оброблення даних, що дозволить здешевити комплекс радіомоніторингу шляхом використанням ноутбука середньої обчислювальної продуктивності замість потужного багатоканального комплексу. Також у досліджуваного радіопеленгатора відсутня похибка дискретності  $h_\theta / 2 = 0,5^\circ$  внаслідок прямої оцінки затримки сигналу.

Проведемо дослідження залежності відносної часової ефективності  $\mu_T$  від ширини смуги  $\Delta F_R$  пропускання радіоприймача пеленгатора при  $D_\theta = 360^\circ$ ;  $h_\theta = 0,1^\circ$ ;  $T_a = 10^{-3}$  с. Отриману залежність відповідно до рівняння (9) зображено на рисунку 2.

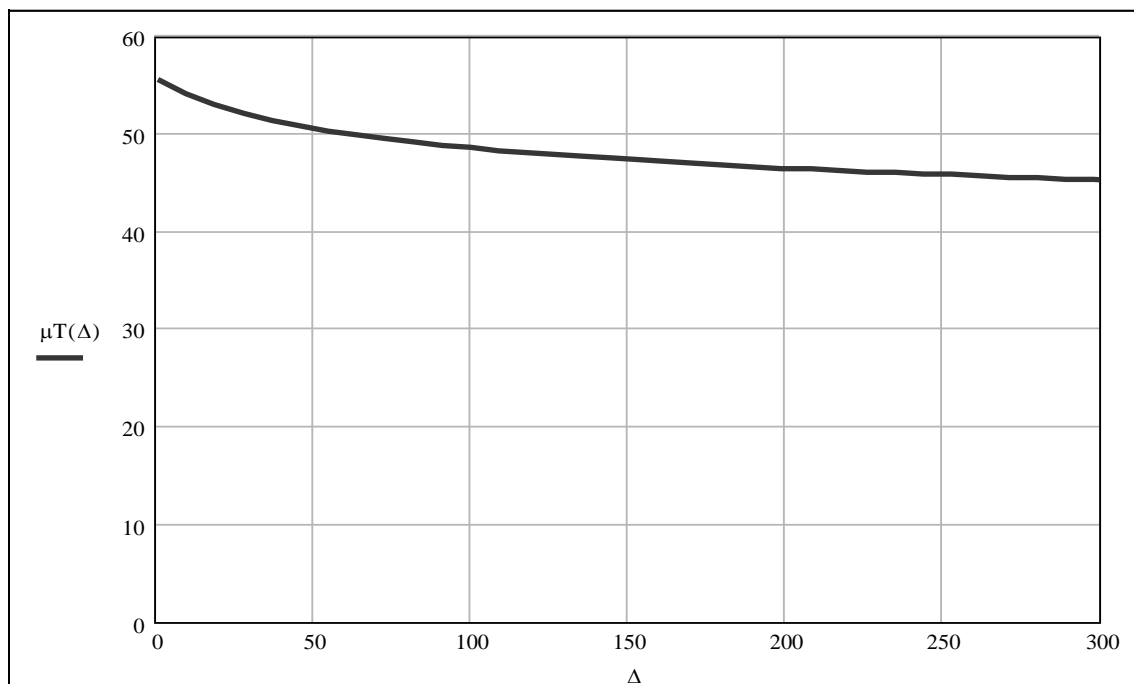


Рис. 2. Залежність відносної часової ефективності  $\mu_T$  від ширини смуги  $\Delta F_R$

Аналіз залежностей на рисунку 2 показує, що відносна часова ефективність  $\mu_T$  відповідного запропонованого пеленгатора обернено пропорційна ширині смуги  $\Delta F_R$  та перевищує 45 разів при виборі ширини смуги пропускання радіоприймача  $\Delta F_R < 250$  МГц.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Отже, виконані дослідження швидкодії показали, що досліджений безпошуковий пеленгатор забезпечує пеленгування усіх радіовипромінювань, що потрапляють у смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 250 МГц в реальному масштабі часу, має високу відносну часову ефективність, що перевищує 45 разів порівняно з відомими пошуковими цифровими спектральними методами кореляційного пеленгування.

Отримані результати доцільно використовувати під час реалізації апаратури систем радіомоніторингу та радіонавігації, які функціонують у складній динамічній ЕМО. Дані дослідження є продовженням роботи з розробки безпошукових спектральних методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування.

У подальшому необхідно виконати оптимізацію та оцінку точності безпошукового спектрального методу дисперсійно-кореляційного радіопеленгування.

#### 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 радіомоніторингу / П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарний, В.С. Ступак ; під заг. ред. П.В. Слободянюка. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2008. – 588 с.
3. 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. – Т. 14. – С. 719–722.
4. 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. – Т. 52, № 4. – Р. 1995–2003.
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. – Mengqi Zhou, 2014. – Р. 52–57.
6. Ципоренко В.В. Безпошуковий цифровий метод спектрального дисперсійно-кореляційного радіопеленгування для великої антенної бази / В.В. Ципоренко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія : Радіотехніка. Радіоапаратурибудування. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – № 50. – С. 66–74.
7. Аналіз швидкодії безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з двовимірним кореляційним обробленням просторового сигналу / В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко, В.В. Чухов,

- O.V. Andreev* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2018. – № 1 (81). – С. 210–216.
8. Low-complexity range and angle two-dimensional gold-MUSIC for multi-carrier frequency MIMO radar / *X.Mengying, S.Weimin, G.Hong and other* // *Electronics Letters*. – 2018. – Т. 54, № 18. – С. 1088–1089.
  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. – С. 7749–7753.
  10. *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 с.
  11. Multicore Fixed and Floating-Point Digital Signal Processor TMS320C6678 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [www.ti.com/product/tms320c6678](http://www.ti.com/product/tms320c6678).

#### References:

1. Rembovskij, A.M., Ashihmin, A.V. and Koz'min, V.A (2010), *Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva*, in Rembovskij, A.M. (ed.), 2-e izd., pererab. i dop., Gorjachaja linija, Telekom, Moskva, 624 p.
2. Slobodjanjuk, P.V., Blagodarnyj, V.G. and Stupak, V.S. (2008), *Dovidnyk z radiomonitoringu*, in Slobodjanjuk, P.V. (ed.), Aspekt-Poligraf, Nizhyn, 588 p.
3. 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.
4. Houcem, G., Jean, P.D. and Larsys Sergio, M.J. (2016), «Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources», *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 52, No. 4, pp. 1995–2003.
5. Jian, Y., Wangjie, C., Lei, L. and Xiaokang, N. (2014), *Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source*, Signal Processing, 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, Mengqi Zhou, pp. 52–57.
6. Cyporenko, V.V. (2012), «Bezposhukovyj cyfrovij metod spektral'nogo dyspersijno-koreljacijnogo radiopelenguvannja dlja velykoi' antennoi' bazy», *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu Ukrai'ny «Kyj'vs'kij politehničnyj instytut»*, Serija *Radiotehnika. Radioaparaturubuduvannja*, NTUU «KPI», Kyj'v, No. 50, pp. 66–74.
7. Cyporenko, V.V., Cyporenko, V.G., Chuhov, V.V. and Andreev, O.V. (2018), «Analiz shvydkodii' bezposhukovogo cyfrovogo koreljacijno-interferometryčnogo pelengatora z dvovymirnym koreljacijnym obroblennjam prostorovogo sygnalu», *Visnyk Zhytomyr'skogo derzhavnogo tehničnogo universytetu*, Serija *Tehnični nauky*, ZhDTU, Zhytomyr, No. 1 (81), pp. 210–216.
8. Mengying, X., Weimin, S., Hong, G., Zheng, D., Wenjuan, L. and Jianchao, Y. (2018), «Low-complexity range and angle two-dimensional gold-MUSIC for multi-carrier frequency MIMO radar», *Electronics Letters*, Vol. 54, No. 18, pp. 1088–1089.
9. Xiao, F., Sidiropoulos, N.D., Wing-Kin, M. and Tranter, J. (2014), «Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT», *Acoustics, Speech and Signal Processing IEEE International Conference ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014, proceedings*, Marco Luise, Pisa, pp. 7749–7753.
10. Proakis, J.G. and Manolakis, D.G. (2006), *Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications*, 4th Edition, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, USA, 1077 p.
11. *Multicore Fixed and Floating-Point Digital Signal Processor TMS320C6678*, [Online], available at: [www.ti.com/product/tms320c6678](http://www.ti.com/product/tms320c6678)

**Ципоренко** Віталій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- радіомоніторинг;
- цифрова обробка сигналів.

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

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

**Ципоренко** Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- радіомоніторинг;
- цифрова обробка сигналів.

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

**Андрєєв** Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- радіосистеми передавання інформації.

Стаття надійшла до редакції 13.04.2020.