

М.В. Коваленко, д.т.н., проф.,
В.В. Ципоренко, аспір.,
В.Г. Ципоренко, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ШИРОКОСМУГОВОГО КОРЕЛЯЦІЙНОГО ЦИФРОВОГО РАДІОПЕЛЕНГАТОРА

Обґрунтовано принципи побудови широкосмугового цифрового кореляційного пеленгатора, показано доцільність використання обробки комплексного частотного спектра суміші радіовипромінювань. Виконано аналіз точності частотного цифрового кореляційного пеленгування і синтезовано алгоритм обробки радіосигналів з урахуванням процедури цифрового гетеродинування та неідентичності передаточних характеристик пеленгаційних каналів. Проведено дослідження ефективності синтезованого алгоритму пеленгування для умов складної електромагнітної обстановки і показано, що ефективність пеленгування із застосуванням частотної обробки суттєво краща порівняно з часовою обробкою.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Актуальним завданням функціонування сучасних радіоелектронних систем добування інформації, радіоконтролю, радіонавігації та радіокерування є оперативний контроль місцезнаходження радіоелектронних засобів (РЕЗ). При великій апріорній невизначеності та наявності відносно інтенсивних завад це завдання доцільно вирішувати шляхом використання часового або частотного широкосмугового кореляційного пеленгування [15, 18]. Перспективним напрямком застосування цих методів пеленгування є використання цифрової обробки сигналів [5, 13, 14].

Підвищити ефективність обробки радіосигналів можливо шляхом скорочення обчислювальних витрат при проміжних перетвореннях, або повного виключення проміжних перетворень. Останній варіант передбачає використання спеціальних методів аналізу із застосуванням тільки однієї області визначення, тобто так званої монофазної обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми. В роботах [4, 5] наведені результати аналізу ефективності часової монофазної обробки радіосигналів, але тільки для простої електромагнітної обстановки (ЕМО).

В роботах [4, 6] також виконано порівняльний аналіз часової та частотної обробок радіосигналів для задач радіолокації, але для обмеженої кількості етапів обробки (для етапів виявлення та аналізу) і для умов простої ЕМО. Показано, що при певних умовах ефективність обробки в цілому зростає при використанні проміжного спектрального аналізу, що здійснюється на основі алгоритму швидкого перетворення Фур'є.

У роботах [15, 18, 20] виконано аналіз кореляційного пеленгування і принципів його реалізації з використанням часової області визначення для умов простої ЕМО і невеликої апріорної невизначеності.

Застосування частотних методів обробки радіосигналів тільки для окремих операцій розглянуто також в роботах [7, 8].

У роботі [15] наведені результати дослідження впливу неідентичності частотних характеристик пеленгаційних каналів на точність визначення кореляційної функції, але дані дослідження отримані для вузькосмугового пеленгатора.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Таким чином, реалізація цифрового широкосмугового кореляційного пеленгування із застосуванням частотної області визначення для умов складної ЕМО і значної апріорної невизначеності досліджена на сьогодні не достатньо.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Мета даної статті – дослідження принципів побудови та ефективності широкосмугового кореляційного радіопеленгування із використанням частотної області визначення для умов складної ЕМО і великої апріорної невизначеності.

Викладення основного матеріалу дослідження. Розглянемо випадок функціонування широкосмугового пеленгатора в складній ЕМО, коли необхідно здійснювати прийом та обробку адитивної суміші $U(t)$ сукупності незалежних радіовипромінювань радіоелектронних засобів і статистично незалежного нормального рівномірно розподіленого шуму $n(t)$:

$$U(t) = \sum_{p=1}^{m_s} S_p(t) + n(t), \quad (1)$$

де $S_p(t)$ – радіосигнал p -го РЕЗ;

m_s – кількість радіосигналів у суміші.

Нехай кількість m_s і значення параметрів радіосигналів є величинами випадковими, у яких відомі діапазони зміни та закони розподілу ймовірностей їх можливих значень. Будемо вважати, що частотні спектри радіосигналів у суміші $U(t)$ визначаються через перетворення Фур'є [1] і не перекриваються по частоті та розділені певним захисним інтервалом Δf_s .

Для цих умов необхідно оптимальним чином здійснити пошук по частоті радіосигналів $S_p(t)$, їх розділення, обробку та проведення пеленгування. Нехай вказана обробка суміші $U(t)$ реалізується паралельно в межах смуги робочих частот та в цифровій формі.

Для вирішення поставленої задачі вхідна суміш $U(t)$ перетворюється спочатку в цифрову послідовність $U(n)$ шляхом аналого-цифрового перетворення [2, 6, 9] з періодом дискретизації T_d :

$$U(n) = U(n \cdot T_d), \tag{2}$$

де $n = 0, 1, \dots (N_s - 1)$.

Прийом суміші $U(t)$ здійснюється впродовж певного часового інтервалу T_a аналізу. В результаті формується реалізація суміші як масив із N_s відліків $\{U(n)\}_{N_s}$:

$$N_s = \frac{T_a}{T_d} = T_a \cdot F_d, \tag{3}$$

де $F_d = 1/T_d$ – частота дискретизації.

При використанні частотної області визначення для часової реалізації $\{U(n)\}_{N_s}$ визначається її комплексний частотний спектр $\{U(jf_k)\}_{N_s}$ на основі дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) з певним типом «вікна» [9]:

$$U(jf_k) = \sum_{p=1}^{m_s} S_p(jf_k) + n(jf_k), \tag{4}$$

де $S_p(jf_k)$, $n(jf_k)$ – відповідно комплексні дискретні спектри p -го радіосигналу та шуму;

$k = 0, 1, \dots (N_s - 1)$.

У цьому випадку при пеленгуванні оптимальна обробка спектра суміші $\{U(jf_k)\}_{N_s}$ реалізується на основі узгодженої фільтрації або кореляційного частотного аналізу [10, 11, 12].

Для умов апіорної невизначеності щодо форми і параметрів випромінювань РЕЗ, що пеленгуються, та при наявності шуму доцільне використання кореляційного пеленгування [15, 18, 20].

Частотне цифрове кореляційне пеленгування здійснюється згідно з рівнянням [16]:

$$\Theta = P\{\tau_3\} = P\{\max(k_{12}(\tau_n, f_k))\}, \tag{5}$$

де Θ – напрямок на РЕЗ;

$P\{\tau_3\}$ – функціональна залежність пеленгу від часу затримки;

$k_{12}(\tau_n, f_k) = B \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \text{Re}[S_l(jf_k) \cdot S_l^*(jf_k) \cdot \exp(j2\pi f_k \tau_n)]$ – дискретна частотна взаємна кореляційна функція;

$S_l(jf_k)$ – комплексний спектр l -го радіосигналу, що прийнятий першим радіоканалом;

$S_l^*(jf_k)$ – комплексно-спряжений спектр l -го радіосигналу, що прийнятий другим радіоканалом;

$\text{Re}[\cdot]$ – операція визначення дійсної частини комплексного числа;

$(\cdot)^*$ – операція комплексного спряження;

B – коефіцієнт пропорційності;

$f_k = \frac{k}{T_d} \cdot N$ – k -й відлік частоти, $k = 0, 1, \dots (N - 1)$.

Аналіз рівнянь (4) та (5) показує, що особливостями реалізації цифрового широкопasmового кореляційного пеленгування є необхідність обробки суміші спектрів випромінювань, що отримані після аналого-цифрового перетворення вихідних сигналів широкопasmових радіоканалів прийому.

Дослідимо точносні параметри широкосмугового цифрового кореляційного радіопеленгатора.

Основними специфічними складовими похибки цифрового кореляційного радіопеленгатора для вказаних умов є похибка дискретності, яку доцільно віднести до методичної похибки, та похибка неідентичності, що зумовлена неоднаковістю параметрів пеленгаційних радіоканалів, яку доцільно віднести до інструментальної похибки. Інші складові похибки пеленгування кореляційного пеленгатора проаналізовані в роботах [3, 15, 17, 18, 20].

Виконаємо аналіз похибки дискретності, яка зумовлена дискретністю представлення у часі прийнятих радіоканалами сигналів після їх аналого-цифрового перетворення і відповідно їх взаємно кореляційної функції [13].

Для частотного цифрового кореляційного радіопеленгування використовується обробка спектрів радіосигналів з використанням інтегрованих параметрів їх частотних складових амплітуди та фази. Тому дискретність сигналів, що обробляються, впливає тільки на загальну структуру їх спектрів при незмінних параметрах окремих складових. В результаті залежність спектра сигналу від частоти дискретизації визначається наступним співвідношенням [9, 13, 19]:

$$S(j\omega_k) = S(j\omega_k \pm 2\pi F_D \cdot m), \quad (6)$$

де $m = 1, 2, 3, \dots$ – довільне ціле число.

Рівняння (6) показує, що спектр сигналу повторюється періодично з періодом $\omega = m \cdot 2\pi F_D$.

Таким чином, використання частотної форми сигналів зумовлює незалежність їх комплексного спектра від частоти дискретизації і відповідно результатів їх кореляційної обробки. У цьому випадку похибка дискретності $\Delta t(f)$ визначається вже похибкою формування кодів часу затримки δ_k в рівнянні (5) і від значення періоду дискретизації T_{D2} безпосередньо не залежить. Тому період дискретизації доцільно вибирати мінімально можливим для заданого значення рівня завадозахищеності за відомою методикою з використанням явища цифрового гетеродинування [13, 19].

У цьому випадку похибка дискретності визначається рівнянням:

$$\Delta t(f) = \frac{\tau_{\max}}{\delta k} = \frac{d}{c} (2^{-r}), \quad (7)$$

де c – швидкість світла;

d – база розміщення радіоканалів;

r – розрядність коду часу затримки;

τ_{\max} – максимально можливе значення затримки.

Для цих умов максимальна похибка пеленгування не перевищує:

$$\Delta \Theta_{\max}(f) = \arccos\left(\frac{c \cdot \tau_3}{d}\right) - \arccos\left(\frac{c \cdot (\tau_3 + \tau_{\max} \cdot 2^{-r})}{d}\right), \quad (8)$$

де τ_3 – значення часу затримки.

Для порівняння, при часовому цифровому кореляційному радіопеленгуванні похибка дискретності визначення затримки сигналу не перевищує половини періоду дискретизації $T_D/2$, тому для підвищення точності пеленгування необхідно підвищувати частоту дискретизації сигналів.

Максимальне значення похибки часового кореляційного пеленгування дорівнює:

$$\Delta \Theta_{\max}(t) = \arccos\left(\frac{c \cdot \tau_3}{d}\right) - \arccos\left(\frac{c \cdot (\tau_3 + T_D)}{d}\right). \quad (9)$$

Порівнюючи вирази $\Delta \Theta_{\max}(t)$ і $\Delta \Theta_{\max}(f)$, бачимо, що похибка пеленгації $\Delta \Theta_{\max}(f)$ при однаковій частоті дискретизації для частотного метода пеленгування значно менша, ніж $\Delta \Theta_{\max}(t)$ для часового метода пеленгування за рахунок того, що $T_D \gg \tau_3 \cdot 2^{-r}$. Можливість використання мінімального значення частоти дискретизації при частотному кореляційному пеленгуванні забезпечує суттєве скорочення кількості відліків N_s реалізацій прийнятих сумішей радіоканалами і відповідно підвищення ефективності їх обробки.

Оцінимо переваги γ щодо зменшення частоти дискретизації при пеленгуванні із застосуванням обробки спектрів сигналів:

$$\gamma = \frac{F_{Dt}}{F_{Df}} = \frac{1}{4 \cdot \Delta\tau_3 \cdot D_f}, \tag{10}$$

де $F_{Dt} = 1/T_d = 1/2 \cdot \Delta\tau_3$, $F_{Df} = 2 \cdot D_f$ – відповідно частота дискретизації при часовій та частотній обробках;

$\Delta\tau_3 = k \cdot d / c$ – похибка визначення часу різниці ходу сигналів.

Для прикладу оцінимо вигравш γ для сучасних умов проведення радіоконтролю в декаметровому діапазоні радіохвиль, коли $\Delta\tau_3 = 0,001 \cdot d / c$; $d = 1\text{ м}$; $D_f = 200\text{ кГц}$. В цьому випадку перевага γ перевищує порядок.

Основною складовою інструментальної похибки для широкосмугових пеленгаторів є похибка, зумовлена неідентичністю частотних характеристик пеленгаційних радіоканалів.

В цілому неідентичність радіоканалів значно погіршує точність пеленгування і особливо значна при великій ширині смуги пропускання пеленгатора [15]. Для забезпечення високої точності пеленгування в широкій смузі частот доцільне усунення неідентичності радіоканалів шляхом її компенсації [7, 15].

Для усунення цієї неідентичності доцільне використання алгоритму обробки комплексних частотних спектрів прийнятих радіовипромінювань, при якому пеленг визначають з урахуванням неідентичності характеристик пеленгаційних каналів у рівнянні (5), що попередньо вимірюється, згідно з формулою:

$$S_l(j\omega_k) = S_l(\omega_k) \cdot K_{нд}(\omega_k) \cdot \exp(j \cdot (\varphi_{lk} + \varphi_{нд,k} + \tau_n \cdot \omega_k)), \tag{11}$$

де $S_l(\omega_k)$ – амплітудний спектр l -го прийнятого випромінювання;

$K_{нд}(\omega_k)$ – амплітудно-частотне корегування;

φ_{lk} – початкова фаза k -ої складової спектра;

$\varphi_{нд,k}$ – фазочастотне коригування;

τ – змінна кореляційної функції.

Особливістю даного алгоритму є забезпечення можливості одночасного пеленгування декількох РЕЗ з високою точністю та завадозахищеністю.

Проведемо аналіз ефективності широкосмугового цифрового кореляційного частотного пеленгування.

Ефективність обробки радіосигналів радіопеленгатором будемо оцінювати через кількість необхідних арифметичних операцій, що припадає на один радіосигнал [2]:

$$\chi = \frac{M_0}{n_s}, \tag{12}$$

де M_0 – кількість арифметичних операцій, що необхідна для обробки прийнятої суміші радіосигналів;

n_s – кількість радіосигналів, що приймається та обробляється за певний інтервал часу.

Кількість арифметичних операцій M_{of} , яку необхідно виконати для частотного пеленгування оцінимо виразом:

$$M_{of} = N_{\Theta} \cdot n_{lf} + N_{CA}, \tag{13}$$

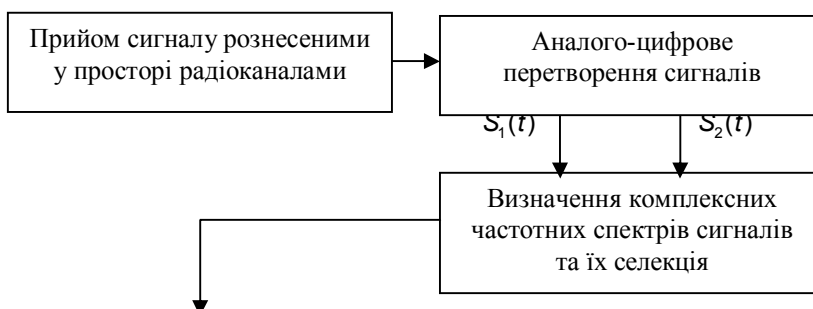
де $N_{\Theta} = \pi / \Delta\Theta$ – кількість можливих значень пеленгу;

$\Delta\Theta$ – дискретність визначення пеленгу;

n_{lf} – кількість операцій, що необхідна для визначення l -ї частотної кореляційної функції;

N_{CA} – кількість операцій, що реалізують спектральний аналіз суміші $U(t)$.

Блок-схема розробленого алгоритму частотного кореляційного пеленгування представлена на рис. 1.



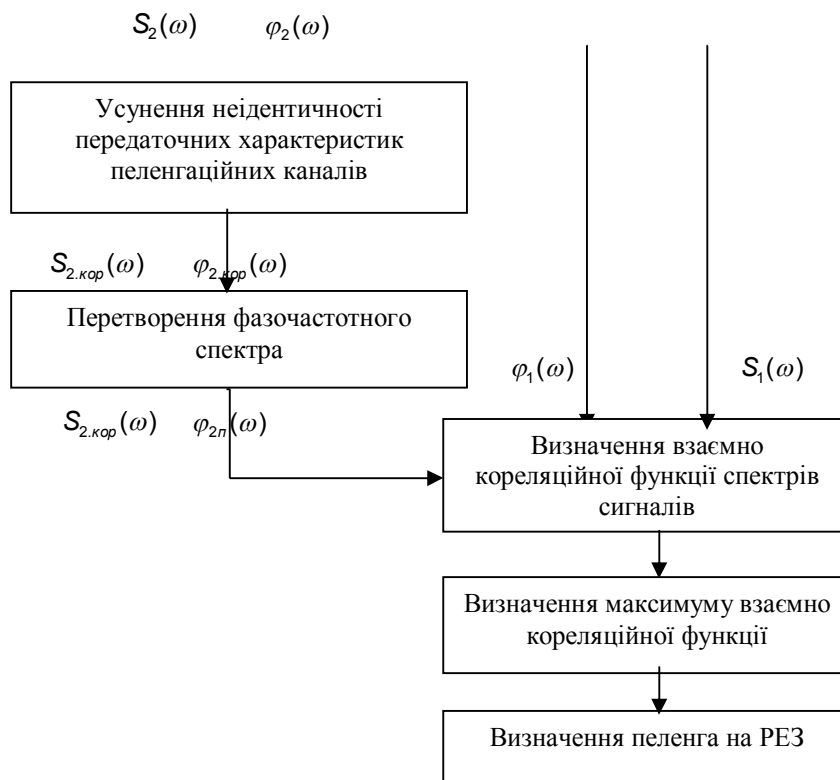


Рис. 1. Блок-схема алгоритму частотного кореляційного пеленгування

Для процедур пошуку, виявлення та аналізу параметрів радіосигналів кількість операцій n_{lf} оцінимо через кількість операцій множення, що є найбільш трудомісткими [6, 10]:

$$n_{lf} = \frac{2 \cdot \Delta f_s}{h_f} = \frac{2 \cdot \Delta f_s}{F_d / N_s} = 2 \cdot \Delta f_s \cdot N_s \cdot T_d = N_s \cdot \Delta f_s / D_f, \quad (14)$$

де D_f – діапазон частот одночасного аналізу;

Δf_s – ширина спектру l -го радіосигналу.

При обробці спектру суміші $U(jf\kappa)$, або частотній обробці, в середньому кількість радіосигналів m_s , яка може бути одночасно прийнята, визначається співвідношенням ширини D_f діапазону частот одночасного аналізу та ширини спектра Δf_s радіосигналів:

$$\bar{m}_s = D_f / (\bar{\Delta f}_s + \Delta f_\delta), \quad (15)$$

де $\bar{\Delta f}_s \gg \Delta f_\delta$ – середнє значення ширини спектра радіосигналів.

У результаті ефективність пеленгування із застосуванням обробки спектра суміші $U(jf\kappa)$ та з урахуванням рівнянь (12), (13), (14) та (15) матиме вигляд:

$$\chi_f = \frac{M_{of}}{\bar{m}_s} = \frac{\pi \cdot N_s \cdot \bar{\Delta f}_s \cdot (\bar{\Delta f}_s + \Delta f_\delta)}{\Delta\Theta \cdot D_f^2} + \frac{N_s (\log_2 N_s) \cdot (\bar{\Delta f}_s + \Delta f_\delta)}{D_f}. \quad (16)$$

Аналіз рівняння (16) показує, що ефективність χ_f частотної обробки радіосигналів покращується при збільшенні величини діапазону частот D_f одночасного аналізу, а також при зменшенні ширини спектра радіосигналів і захисного інтервалу Δf_δ . Також з рівняння (16) видно, що граничне, найгірше, значення ефективності χ_{fm} відповідає випадку, коли $m_s = 1$ і $D_f = (\Delta f_{s \min} + \Delta f_{\delta \min})$:

$$\chi_{fm} = N_s \cdot \pi / \Delta\Theta + N_s \log_2 N_s. \quad (17)$$

Для порівняння виконаємо аналіз ефективності пеленгування із застосуванням прийому та оптимальної обробки суміші $U(t)$ і використанні часової області визначення, тобто на основі класичного кореляційного аналізу або узгодженої фільтрації без зміни вихідних умов задачі [4, 6].

Часове цифрове кореляційне пеленгування здійснюється згідно з рівнянням [15, 17]:

$$\Theta = P \{ \tau_3^{\epsilon} \} = P \{ \max(k_{12}(\tau_n, t_k)) \}, \quad (18)$$

де $P \{ \cdot \}$ – оператор визначення напрямку за оцінкою часу затримки τ_3^{ϵ} ;

$$k_{12}(\tau_n, t_k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_l(t_k) \cdot S_l(t_k - \tau_n) \text{ – дискретна часова взаємна кореляційна функція};$$

$U_l(t_k)$ – реалізація l -го радіосигналу, що прийнятий першим радіоканалом;

$U_l(t_k)$ – реалізація l -го радіосигналу, що прийнятий другим радіоканалом;

$t_k = k \cdot T_d$ – k -й відлік часу, $k = 0, 1, \dots (N - 1)$;

T_d – період дискретизації радіосигналів $U_1(t), U_2(t)$;

$\tau_n = n \cdot T_\tau$ – n -те значення часу затримки $n = 0, 1, 2, \dots (N - 1)$;

T_τ – дискретність формування часу затримки.

Загальна кількість арифметичних операцій $M_{\alpha t}$, що необхідна для пеленгування із застосуванням часової оптимальної обробки суміші $U(t)$ дорівнює:

$$M_{\alpha t} = N_{\Theta} \cdot n_{lt}, \quad (19)$$

де n_{lt} – кількість операцій, що необхідна для визначення l -ї часової кореляційної функції $K_l(t)$.

При цьому величину n_{lt} оцінимо також тільки з урахуванням операцій множення [9, 13]:

$$n_{lt} = N_s. \quad (20)$$

В результаті маємо оцінку ефективності пеленгування χ_t із застосуванням часової обробки суміші радіосигналів для умов середньої завантаженості діапазону частот D_f :

$$\chi_t = \frac{M_{\alpha t}}{\bar{n}_s} = \frac{N_s \cdot \pi \cdot (\Delta f_s + \Delta f_\delta)}{\Delta \Theta \cdot D_f}. \quad (21)$$

Аналіз рівняння (21) показує, що граничне, найкраще, значення ефективності χ_t відповідає випадку, коли кількість радіосигналів у суміші дорівнює $m_s = 1$ і $D_f = (\Delta f_{s \min} + \Delta f_\delta)$:

$$\chi_{tm} = \pi \cdot N_s / \Delta \Theta. \quad (22)$$

Порівняння значень ефективностей пеленгування із застосуванням частотної та часової обробок χ_t та χ_f згідно з рівняннями (16) і (21) показує, що обробка спектра суміші $U(jf)$ ефективніша в Q разів, ніж обробка її часової реалізації $U(t)$:

$$Q = \frac{\chi_t}{\chi_f} = \frac{D_f}{\Delta \bar{f}_s + \frac{\log_2 N_s \cdot D_f \cdot \Delta \Theta}{\pi}} \approx \frac{D_f}{\Delta \bar{f}_s}. \quad (23)$$

Аналіз рівняння (23) показує, що вигреш щодо ефективності частотної обробки збільшується при збільшенні завантаженості діапазону D_f і апріорної невизначеності щодо параметрів радіосигналів.

Для прикладу оцінимо вигреш Q для сучасних умов проведення радіоконтролю в декаметровому діапазоні радіохвиль, коли $\Delta \bar{f}_s = 10$ кГц, $D_f = 200$ кГц і $N_s = 8$ К. У цьому випадку вигреш Q перевищує порядок.

Висновки з дослідження. Таким чином, результати проведеного аналізу показали, що для умов складної ЕМО з великою апріорною невизначеністю, в першу чергу по несучій частоті та ширині спектра радіовипромінювань РЕЗ, доцільним є використання ширококутового пеленгування із застосуванням цифрової обробки комплексного частотного спектра суміші радіовипромінювань $U(jf)$.

Дані принципи побудови забезпечують високі точність і завадозахищеність ширококутового кореляційного пеленгування при великій ефективності обробки порівняно з відомими часовими кореляційними пеленгаторами.

Отримані результати можуть бути використані при синтезі та аналізі сучасної апаратури радіомоніторингу та радіопеленгації на основі цифрових сигнальних процесорів [2, 5, 12], техніки та приладів акусто-оптичного аналізу або аналізаторів на основі дисперсійних ліній затримок. Застосування

результатів досліджень забезпечить суттєве підвищення пропускної спроможності радіоелектронних систем при незмінній якості обробки та апаратних витратах.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямку. В подальшому доцільно виконати дослідження ефективності реалізації запропонованих принципів для умов різних піддіапазонів частот, конкретних типів випромінювань, конкретної галузі використання та за наявності перехресних спотворень сигналів у радіоканалах прийому.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Радиотехнические системы / Под ред. Ю.И. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 486 с.
2. Бобров Д.Ю., Доброжанский А.П., Зайцев Г.В., Маликов Ю.В., Цытин И.Б. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС // Цифровая обработка сигналов. – 2002. – № 2.
3. Комиссаров Ю.А., Родионов С.С. Помехоустойчивость и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – Киев: Техника, 1978. – 208 с.
4. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учеб. пособие / В.А. Васин, И.Б. Власов, Ю.М. Егоров и др. / Под ред. И.Б. Фёдорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2004. – 768 с.
5. Цифровая обработка сигналов: Опыт использования персональных ЭВМ / А.А. Иванько, В.И. Гордиенко, В.М. Соловьев, Я.А. Иванько. – К.: Техника, 1991. – 160 с.
6. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
7. Мартынов В.А., Селихов Ю.И. Панорамные приемники и анализаторы спектра. – М.: Советское радио, 1980. – 352 с.
8. Солодовников А.И., Сиваковский А.М. Основы теории и методы спектральной обработки информации: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. – 272 с.
9. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
10. Ципоренко В.Г. Визначення апостеріорної ймовірності радіосигналу в частотній області // Вісник ЖІТІ / Технічні науки. – 2000. – № 13. – С. 87–91.
11. Обнаружение радиосигналов / П.С. Акимов, Ф.Ф. Евстратов, С.И. Захаров и др. / Под ред. А.А. Колосова. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.: ил.
12. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – С.-Пб: Питер, 2003. – 608 с.
13. Обробка сигналів: Підручник / В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е.Шрюфер. – К.: Либідь, 1996. – 392 с.
14. Цифровые радиоприемные системы: Справочник / М.И. Жодзишский, Р.Б. Мазепа, Е.П. Овсянников и др. / Под ред. М.И. Жодзишского. – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с.
15. Винокуров В.И., Ваккер Р.А. Вопросы обработки сложных сигналов в корреляционных системах. – М.: Советское радио, 1972. – 216 с.
16. Ципоренко В.Г. Частотне кореляційне радіопеленгування // Вісник ЖІТІ / Спеціальний випуск: ІКТ 2002. – 2002. – С. 28–31.
17. Вартанесян В.А., Гойхман Э.Ш., Рогаткин М.И. Радиопеленгация. – М.: Воениздат, 1966. – 248 с.
18. Сорочан А.Г. J-корреляционный метод пеленгации // Радиоэлектроника. – 2001. – № 11. – С. 57–65.
19. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: Справочник. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
20. Белафин О.В. Основы радионавигации: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.

КОВАЛЕНКО Микола Вікторович – доктор технічних наук, завідувач кафедри радіотехніки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– інваріантні антенні системи.

ЦИПОРЕНКО Віталій Валентинович – аспірант кафедри біомедичних приладів та систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– радіопеленгування з використанням цифрової обробки сигналів.

ЦИПОРЕНКО Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– радіоелектроніка з використанням цифрової обробки сигналів.

Подано 10.11.2006

Коваленко М.В., Ципоренко В.В., Ципоренко В.Г. Принципи побудови широкопалосного кореляційного цифрового радіопеленгатора

Коваленко Н.В., Ципоренко В.В., Ципоренко В.Г. Принципы построения широкополосного корреляционного цифрового радиопеленгатора

Kovalenko N.V., Tsiporenko V.V., Tsiporenko V.G. Principles of construction of the broadband correlation digital radio direction finder

УДК 621.37:621.391

Принципи побудови широкопалосного кореляційного цифрового радіопеленгатора / М.В. Коваленко, В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко

Обґрунтовані принципи побудови широкопалосного цифрового кореляційного пеленгатора, показана доцільність використання обробки комплексного частотного спектру суміші радіовипромінювань. Виконано аналіз точності частотного цифрового кореляційного пеленгування і синтезовано алгоритм обробки радіосигналів з урахуванням процедури цифрового гетеродинування та неідентичності передаточних характеристик пеленгаційних каналів. Проведено дослідження ефективності синтезованого алгоритму пеленгування для умов складної електромагнітної обстановки і показано, що ефективність пеленгування із застосуванням частотної обробки суттєво краща в порівнянні із часовою обробкою.

УДК 621.37:621.391

Принципы построения широкополосного корреляционного цифрового радиопеленгатора / Н.В. Коваленко, В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко

Обоснованы принципы построения широкополосного цифрового корреляционного пеленгатора, показана целесообразность использования обработки комплексного частотного спектра смеси радиоизлучений. Выполнен анализ точности частотного цифрового корреляционного пеленгования и синтезирован алгоритм обработки радиосигналов с учетом процедуры цифрового гетеродинирования и неидентичности передаточных характеристик пеленгационных каналов. Проведены исследования эффективности синтезированного алгоритма пеленгования для условий сложной электромагнитной обстановки и показано, что эффективность пеленгования с применением частотной обработки существенно лучше в сравнении с временной обработкой.

УДК 621.37:621.391

Principles of construction of the broadband correlation digital radio direction finder / N.V. Kovalenko, V.V. Tsiporenko, V.G. Tsiporenko

The principles of construction of broadband digital correlation radio direction finder are proved, the expediency of a complex frequency spectrum of mix of radoradiations processing usage is shown. The analysis of accuracy of the frequency digital correlation direction and algorithm of processing of radiosignals is synthesized in view of procedure digital heterodining and unindentical of the transfer characteristics of direction channels is carried out. The researches of efficiency of the synthesized algorithm of direction for conditions of complex electromagnetic conditions are carried out and it is shown, that the efficiency of direction with application of frequency processings is better in comparison with temporary processing.