

ДОСЛІДЖЕННЯ ШИРИНИ РОБОЧОГО СЕКТОРА БЕЗПОШУКОВОГО ЦИФРОВОГО КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГАТОРА З РЕКОНСТРУЮВАННЯМ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІТИЧНОГО СИГНАЛУ

© Ципоренко В. В., 2016

Виконано дослідження ширини робочого сектора та точності пеленгування безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора, що використовує реконструювання просторового аналітичного сигналу. Запропоновано методи розширення робочого сектора пеленгування з використанням реконструювання просторового комплексного сигналу.

Ключові слова: безпошуковий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування; реконструювання сигналу; дослідження ширини робочого сектора.

V. Tsyporenko

Zhytomyr State Technological University

RESEARCH OF WIDTH OF WORKING SECTOR OF DIRECT DIGITAL CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDER WITH RECONSTRUCTION OF SPATIAL ANALYTICAL SIGNAL

© Tsyporenko V., 2016

It was conducted the research of the width of the working sector and the exactness of direct digital correlative-interferometric direction finder that uses reconstruction of spatial analytical signal. It is shown that the main operation that has a basic effect on the width of the working sector of the direction finder is the parallel two-dimensional filtration of the radiation with using of algorithm of fast Fourier transform (FFT). Two-dimensional filtration of the radiation should be carried out in frequency-spatial field of determination with using of two-step fast reconstruction of harmonic components of radio emission. At first stage the parallel frequency filtration of the radiation is implemented in direction finding channels on an intermediate frequency using fast Fourier transform algorithm, followed by rapid reconstruction of selected radiation in the time domain. At second stage the parallel spatial filtration is implemented using a digital synthesis of the multidirected directional pattern, which blocks the working sector of direction finding. It was determined that the width of working sector of direction finding is limited by parasitic distortions in the synthesis of the multidirected directional pattern and depends on the type of weight function of digital pattern formation ("window"), aperture size and number of elements of linear antenna lattice. It was conducted the research of the methods of rapid reconstruction of radio emission in their frequency filtration using real and complex forms of signal representation and its impact on the width of the working sector of direction finding. It was shown the expediency of using of complex reconstructed radiation implementations. The proposed method of expansion of the working sector of direction finding that uses reconstruction of spatial complex analytical signal provides the wider [15–165] degrees sector of direction finding and significantly simplifies direction finding algorithm.

Key words: direct method of correlative-interferometric direction-finding; reconstructing of signal; research of width of working sector.

Вступ

Сьогодні радіопеленгування радіоелектронних засобів здійснюється в умовах складної електромагнітної обстановки, великої апріорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах забезпечення реального масштабу часу. Перспективним напрямом здійснення радіопеленгування для вказаних умов є використання безпошукових цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів [1, 2].

Основною вимогою до сучасних засобів радіопеленгування є забезпечення їх високої завадостійкості та завадозахищеності. Тому розроблення та дослідження безпошукових цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів та дослідження їхньої завадостійкості є актуальним завданням.

У роботі [3] запропоновано безпошуковий цифровий метод спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з використанням антенної решітки (АР), особливостями якого є використання додаткової просторової селекції шумів та завад. Однак дослідження ширини робочого сектора пеленгування цього методу в роботі не виконано.

У роботах [4–6] виконано аналіз точності оцінок пеленга за різних алгоритмів обробки результатів пеленгування, зокрема потенційної точності багатоканального пеленгатора з АР з ненаправлених антенних елементів, а також за наявності флуктуації на шляху поширення сигналу. Однак досліджено тільки пошукові кореляційно-інтерферометричні методи пеленгування, використовуючи які для забезпечення пеленгування в реальному масштабі часу, необхідно здійснювати багатоканальну кореляційну обробку даних або збільшувати крок дискретності оцінки затримки, що збільшує методичну похибку пеленгування. Однак дослідження особливостей безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з реконструюванням просторового аналітичного сигналу не виконано.

Отже, не вирішеною раніше частиною загальної проблеми забезпечення високої точності пеленгування безпошукових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є дослідження та збільшення ширини робочого сектора безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з реконструюванням просторового аналітичного сигналу.

З урахуванням не вирішених раніше частин загальної проблеми цілями статті є: дослідження та збільшення ширини робочого сектора безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з реконструюванням просторового аналітичного сигналу.

Аналітичні дослідження

Виконаємо аналіз ширини робочого сектора D_q пеленгування безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора, що використовує реконструювання просторового аналітичного сигналу.

Нехай у горизонтальній площині прийнято лінійною АР випадкове гауссове квазінеперервне стаціонарне дійсне радіовипромінювання $S(t)$ з рівномірним енергетичним спектром $S^2(w) = const$. Вважатимемо, що джерело радіовипромінювання (ДРВ) є точковим, розміщене в дальній зоні, а випромінювання $S(t)$ має плаский фронт. АР складається із Z ідентичних пеленгаційних радіоканалів. Радіоканали АР мають власні адитивні стаціонарні нормальні шуми $n_z(t)$ з нульовим математичним очікуванням та однаковою спектральною густиною потужності N , що постійна в межах смуги $[w_{S,L}; w_{S,H}]$ пропускання радіоканалів пеленгатора. Будемо вважати, що власні шуми радіоканалів АР не мають міжканальної кореляції та кореляції з сигналами, що приймаються. Також вважатимемо, що фазові флуктуації на шляху поширення сигналу відсутні. Отже, початкові умови досліджень можна подати так:

$$U_z(t) = S(t - t_z) + n_z(t), \quad (1)$$

де $U_z(t)$ – суміш, що приймається z -м пеленгаційним каналом; $S(t - t_z)$ – корисний сигнал, що приймається z -м пеленгаційним каналом; t_z – затримка корисного сигналу в z -му каналі відносно

певного опорного каналу, що залежить від напрямку на ДРВ; $n_z(t)$ – адитивний гауссів шум з рівномірним розподілом густини потужності N в межах смуги одночасного аналізу z -го каналу.

Точність пеленгування оцінюється за величиною дисперсії s_q^2 похибки оцінки напрямку на ДРВ [1, 4]. Розподіл густини імовірності випромінювання $S(t)$ за частотою f рівномірний: $p(f) = 2p / (w_{S,H} - w_{S,L})$. Розподіл густини імовірності $p(q)$ напрямку на ДРВ також рівномірний: $p(q) = 1/p$. Смуга частот, зайнята спектром $S(j\omega)$ радіовипромінювання, апріорі відома.

Для заданих початкових умов (1) в роботі [3] запропоновано безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу для оцінки \hat{q} напрямку на ДРВ:

$$\hat{q} = \arccos[\hat{\Omega} \cdot c / w_{S,L}], \quad (2)$$

де
$$\hat{\Omega} = \frac{1}{z_2 - z_1} \cdot \arctg \left[\frac{\sum_{k=k_{L_s}}^{k_{H_s}} H_B(w_{S,k}) \cdot S_{12A,k}(\Omega_p, z_1, z_2) \cdot \sin(\Delta\hat{\Psi}_{A,k}(\Omega_p, \Delta z) \cdot K_g(w_{S,k}))}{\sum_{k=k_{L_s}}^{k_{H_s}} H_B(w_{S,k}) \cdot S_{12A,k}(\Omega_p, z_1, z_2) \cdot \cos(\Delta\hat{\Psi}_{A,k}(\Omega_p, \Delta z) \cdot K_g(w_{S,k}))} \right] +$$

$$+\Delta\hat{\Psi}_W(\Omega_p, \Delta z) + v \cdot p$$
 – оцінка

просторової частоти сигналу $S(t)$; $z_2 - z_1 = \Delta z$ – просторовий зсув у межах апертури АР; d – відстань між елементами АР; z_1, z_2 – номери елементів АР, для яких здійснюється реконструювання просторового аналітичного сигналу; $H_B(w_{S,k})$ – комплексна частотно-просторова характеристика відбілювального фільтра; $S_{12A,k}(\Omega_p, z_1, z_2)$ – модуль комплексного взаємного просторового аналітичного сигналу; $\Omega_p = 2p \cdot p / d \cdot Z$ – значення просторової частоти, що відповідає напрямку p -ї пелюстки багатопелюсткової ДС, $p = 0, 1, \dots, (Z - 1)$; $\Delta\hat{\Psi}_{A,k}(\Omega_p, \Delta z) = \hat{\Psi}_{A,k}(\Omega_p, z_2) - \hat{\Psi}_{A,k}(\Omega_p, z_1)$ – оцінка фазового зсуву просторового аналітичного сигналу на відстані Δz ; $\hat{\Psi}_{A,k}(\Omega_p, z_1) = \arctg[\hat{U}_{A,k}(\Omega_p, z_1) / U_{A,k}(\Omega_p, z_1)]$ – оцінка миттєвої фази просторового аналітичного сигналу в точці z_1 ; $\hat{U}_{A,k}(\Omega_p, z_1) = \sum_{p=P_L}^{P_H} S_{A,k}(\Omega_p) \cdot \sin(\Omega_p \cdot z_1 + j_{A,k}(\Omega_p))$ – уявна складова k -го

просторового аналітичного сигналу в точці z_1 ; $U_{A,k}(\Omega_p, z_1) = \sum_{p=P_L}^{P_H} S_{A,k}(\Omega_p) \cdot \cos(\Omega_p \cdot z_1 + j_{A,k}(\Omega_p))$ – дійсна складова k -го просторового аналітичного сигналу в точці z_1 ; $S_{A,k}(\Omega_p), j_{A,k}(\Omega_p)$ – амплітудний та фазовий спектри просторового аналітичного сигналу відповідно; $\Delta\hat{\Psi}_W(\Omega_p, \Delta z)$ – оцінка цілої частини фазового зсуву просторового аналітичного сигналу на відстані Δz ; $K_g(w_{S,k}) = w_{S,L} / w_{S,k}$ – коефіцієнт дисперсійного вирівнювання фазового зсуву; $w_{S,L}, w_{S,k}$ – нижня та k -та частоти спектра $U_z(jw_{S,k})$ прийнятої суміші в межах смуги пропускання пеленгатора на робочій частоті відповідно; k_{L_s}, k_{H_s} – номери нижньої та верхньої частот спектра $U_z(jw_{S,k})$ прийнятої суміші в межах смуги пропускання пеленгатора відповідно; c – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі; v – коефіцієнт корегування неоднозначності для функції $\arctg(\cdot)$: $v = 0$, якщо $\cos(\Delta j) > 0$; $v = -1$, якщо $\cos(\Delta j) < 0$.

Аналіз рівняння (2) показує, що безпошукова кореляційна оцінка \hat{q} напрямку на ДРВ здійснюється на основі паралельної двовимірної частотно-просторової фільтрації радіовипромінювання $S(t)$, що реалізується на основі алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) у частотній області визначення [7]. Просторовий спектральний аналіз здійснюється синтезом комплексної багатопелюсткової діаграми спрямованості (ДС) $U_k(j\Omega_p)$ на основі алгоритму ШПФ

з подальшою просторовою селекцією сигнальних груп $\{U_k(j\Omega_p)\}_{p \in [p_L; p_H]}$ на її виході. Синтез комплексної багатопелюсткової ДС визначається рівнянням [3, 7]:

$$U_k(j\Omega_p) = \sum_{z=0}^{Z-1} \operatorname{Re}[U_z(jw_{S,k})] \cdot \exp(-j\Omega_p \cdot z) \cdot W_q(z), \quad (3)$$

де $U_k(j\Omega_p)$ – комплексний просторовий спектр для k -ї складової часових спектрів $U_z(jw_{S,k})$ прийнятих реалізацій $U_z(t)$; $W_q(z)$ – вагова функція цифрового діаграмоутворення (“вікна”).

Сигнальні групи $\{U_k(j\Omega_p)\}_{p \in [p_L; p_H]}$ мають у своєму складі локальні екстремуми просторового спектра $U_k(j\Omega_p)$, отриманого з використанням (3), і є сукупністю відгуків суміжних пелюсток багатопелюсткової ДС на дію вхідного випромінювання.

Доцільно розглянути два варіанти реалізації реконструювання випромінювань для виділених сигнальних груп $\{U_k(j\Omega_p)\}_{p \in [p_L; p_H]}$: перший – з використанням аналітичного просторового сигналу $U_{A,k}(jz)$, другий – із застосуванням комплексного просторового сигналу $U_{C,k}(jz)$:

$$\begin{aligned} U_{A,k}(jz) &= \sum_{p=p_L}^{p_H} \left(\sum_{z=0}^{Z-1} \operatorname{Re}[U_z(jw_{S,k})] \cdot \exp(-j\Omega_p \cdot z) \cdot W_q(z) \right) \cdot \exp(j\Omega_p \cdot z) = \\ &= U_{A,k} \cdot W_q(z) \cdot \exp(j(\Omega_{A,k} \cdot z + \Psi_{A,k})); \\ U_{C,k}(jz) &= \sum_{p=p_L}^{p_H} \left(\sum_{z=0}^{Z-1} U_z(jw_{S,k}) \cdot \exp(-j\Omega_p \cdot z) \cdot W_q(z) \right) \cdot \exp(j\Omega_p \cdot z) = \\ &= U_{C,k} \cdot W_q(z) \cdot \exp(j(\Omega_{C,k} \cdot z + \Psi_{C,k})), \end{aligned} \quad (4)$$

де $\Omega_{A,k}, \Omega_{C,k}$ – просторові частоти k -ї спектральної складової сигналу, аналітичного та комплексного просторових сигналів відповідно; $U_{A,k}, \Psi_{A,k}, U_{C,k}, \Psi_{C,k}$ – амплітуда та початкова фаза аналітичного та комплексного просторових сигналів відповідно.

Аналіз рівнянь (4) показує, що цифровий синтез багатопелюсткової ДС доцільно представити за допомогою амплітудної модуляції випадкового квазігармонічного сигналу з використанням як модулювального сигналу дійсної функції $W_q(z)$. Така амплітудна модуляція є двосмуговою, що зумовлює таку ширину $\Delta\hat{\Omega}_S$ просторового спектра реконструйованих сигналів:

$$\Delta\hat{\Omega}_S = 2 \cdot \Delta\Omega_W = 4p \cdot m_S / Z \cdot d, \quad (5)$$

де $\Delta\Omega_W$ – ширина просторового спектра функції $W_q(z)$; m_S – кількість відліків у сигнальній групі.

Умовою відсутності паразитних спотворень сигналу в разі синтезу багатопелюсткової ДС з урахуванням (5) є:

$$(\Delta\hat{\Omega}_S / \Omega_{A,k}) < 1. \quad (6)$$

З урахуванням рівнянь (5) та (6) ширина робочого сектора пеленгування під час реконструювання аналітичного просторового сигналу становить:

$$D_{qA} = p - 4 \cdot \arccos(\Delta\Omega_W \cdot d / p) = p - 4 \cdot \arccos(m_S / Z). \quad (7)$$

Під час реконструювання комплексного просторового сигналу (4) паразитні спотворення усуваються, що зумовлює збільшення ширини робочого сектора пеленгування:

$$D_{qC} = p - 2 \cdot \arccos(m_S / Z). \quad (8)$$

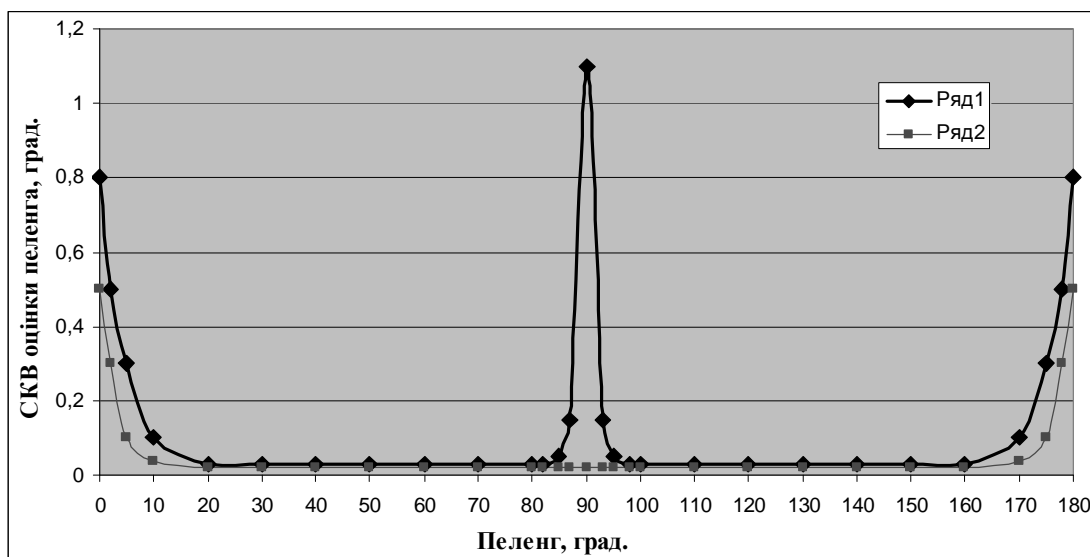
Порівняльний аналіз рівнянь (7) та (8) показує доцільність реконструювання комплексного просторового сигналу, що забезпечує істотне розширення робочого сектора пеленгування.

Результати моделювання

Здійснено програмне моделювання роботи досліджуваного пеленгатора в середовищі MathCad згідно з (2) для умов: тип сигналу – неперервний з лінійною частотною модуляцією: $S(t) = A \cdot \sin(w_0 t + bt^2)$; значення ширини спектра $\Delta f_S = 0,6$ МГц; смуга частот аналізу пеленгаційного

радіоканалу $\Delta f_k = 10$ МГц; робоча частота сигналу $f_s = 2$ ГГц; значення частоти дискретизації $f_d = 2\Delta f_k = 20$ МГц; кількість аналізованих часових відліків: $N_s = 2048$; тривалість процесу аналізу $T_a = 0,1$ мс; використано лінійну АР із кількістю каналів $Z = 64$; номери вибраних елементів АР $z_1 = 21$, $z_2 = 43$; заданий напрямок на ДРВ $q = 60^\circ$.

Отримано залежності середнього квадратичного відхилення (СКВ) оцінки пеленга від напрямку на ДРВ за заданого відношення сигнал/шум 0 дБ з використанням реалізацій радіовипромінювання у вигляді аналітичного просторового сигналу (ряд 1) та комплексного просторового сигналу (ряд 2) (див. рисунок).



Залежності СКВ оцінки пеленга від напрямку на ДРВ

Аналіз рисунка показує, що під час реконструювання аналітичного просторового сигналу робочий сектор пеленгування обмежений двома секторами $D_\theta \in [20^\circ; 82^\circ] \cup [98^\circ; 160^\circ]$, ряд 1, що суттєво знижує ефективність роботи пеленгатора за рахунок ускладнення алгоритму оброблення даних під час пеленгування. Під час реконструювання комплексного просторового сигналу робочий сектор пеленгування стає суцільним $D_\theta \in [15^\circ; 165^\circ]$ та розширюється, що дає змогу істотно спростити алгоритм пеленгування. Загалом результати моделювання та теоретичного аналізу узгоджені.

Висновки

Виконано дослідження ширини робочого сектора та точності пеленгування безпошукового цифрового кореляційно-інтерферометричного пеленгатора, що використовує реконструювання просторового аналітичного сигналу. Запропонований метод розширення робочого сектора пеленгування з використанням реконструювання просторового комплексного сигналу забезпечує розширення суцільного сектора пеленгування $D_\theta \in [15^\circ; 165^\circ]$ та суттєво спрощує реалізацію алгоритму пеленгування.

Надалі доцільно виконати дослідження завадостійкості дослідженого пеленгатора.

1. *Introduction into Theory of Direction Finding // Radiomonitoring and Radiolocation 2000/2001. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG Editor: Gerhard Kratschmer. – HW – UKD.* 2. *Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Кузьмин ; под ред. А. М. Рембовского. 2-е изд. перераб. и доп. М. : Горячая линия – Телеком, 2010. 624 с.* 3. *Ципоренко В. В. Безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового*

аналітичного сигналу // Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут”. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратуробудування. 2012. № 48. С. 75–84. 4. Дзвонковская А. Л., Дмитренко А. Н., Кузьмин А. В. Эффективность измерения углов прихода сигнала радиопеленгаторами на основе метода максимального правдоподобия // Радіотехніка і електроніка. 2001. № 10. С. 1242–1247. 5. Караваев В. В., Сазонов В. В. Статистическая теория пассивной локации. М. : Радио и связь, 1987. 240 с. (№ 27: Статистическая теория связи). 6. Bondarenko M. V. Direction-finding accuracy of the linear digital array under jitter conditions // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2011 : 21th International Crimean Conference : Proceedings. 12–16 Sept., 2011. P. 1128–1129. 7. Dan E. Dudgeon, Russell M. Mersereau. Multidimensional digital signal processing. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1984.

References

1. Introduction into Theory of Direction Finding // Radiomonitoring and Radiolocation 2000/2001. – Rohde & Schwarz GmbH & Co. – KG Editor: Gerhard Kratschmer. – HW – UKD. 2. Rembovskiy A. M. Radiomonitiring – tasks, methods, devices / A. M. Rembovskiy, A. V. Ashyhmin, V. A. Kuzmin ; edited by A. M. Rembovskiy. – 2-nd ed. – M. : Hotline – Telecom, 2010. – 624 p. 3. Tsymporenko V. V. Direct digital method of correlation-interferometer direction-finding with reconstruction of spatial analytical signal / V. V. Tsymporenko // Visnyk of NTUU “KPI”. Ser. Radioengineering. Radiodevices construction. – 2012. – № 48. – P. 75–84. 4. Dzvонovskaya A. L. Effectiveness of measuring of arrival angles of signal of the direction finder based on the maximum verisimilar method / A. L. Dzvонovskaya, A. N. Dmitrenko, A. V. Kuzmin // Radioengineering and electronics. – 2001. – № 10. – P. 1242–1247. 5. Karavayev V. V. Statistic theory of passive location / V. V. Karavayev, V. V. Sazonov. – M. : Radio and communication, 1987. – 240. – (№ 27, Statistic theory of communication). 6. Bondarenko M. V. Direction-finding accuracy of the linear digital array under jitter conditions / M. V. Bondarenko // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2011 : 21th International Crimean Conference : Proceedings. 12–16 Sept., 2011. – P. 1128–1129. 7. Dan E. Dudgeon, Russell M. Mersereau. Multidimensional digital signal processing, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1984.