



УКРАЇНА

(19) UA (11) 97225 (13) C2  
(51) МПК (2011.01)  
G01S 3/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

### (54) СПОСІБ ЦИФРОВОГО КОМПЛЕКСНОГО РАДІОПЕЛЕНГУВАННЯ

1

2

(21) а201107517

(22) 14.06.2011

(24) 10.01.2012

(46) 10.01.2012, Бюл.№ 1, 2012 р.

(72) ЦИПОРЕНКО ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ, ЦИПОРЕНКО ВАЛЕНТИН ГРИГОРОВИЧ

(73) ЖИТОМИРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(56) UA 90068 C2, 25.03.2010.

UA 84964 C2, 10.12.2008.

RU 2253877 C2, 10.06.2005.

RU 2258241 C2, 10.08.2005.

RU 2382379 C2, 20.02.2010.

Ципоренко В.В. Метод кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з дисперсійною обробкою комплексних взаємних спектрів сигналів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія - Радіотехніка. Радіоапаратобудування.-2010.-№42, стор. 26-37, (12 стор.).

(57) Спосіб цифрового комплексного радіопеленгування, згідно з яким здійснюють вибіркового просторовий прийом радіовипромінювання для сукупності можливих напрямків на його джерело лінійною фазованою антенною решіткою шляхом утворення масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та його цифрового комплексного спектрального аналізу, отримуючи комплексні амплітуди спектральних складових із частотами, що відповідають сукупності можливих напрямків на джерело радіовипромінювання, та визначають екстремальну частоту, якій відповідає максимальний рівень модуля комплексної амплітуди спектральної складової, з масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів виділяють підмасив перших його відліків і виконують його комплексний цифровий спектральний

аналіз, потім визначають комплексну амплітуду спектральної складової з екстремальною частотою, після чого визначають різницю аргументів комплексних амплітуд спектральних складових з екстремальною частотою, що визначені для масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного підмасиву перших відліків, далі за екстремальною частотою та з урахуванням різниці аргументів визначають остаточний напрямок на джерело радіовипромінювання, який **відрізняється** тим, що після визначення екстремальної частоти в спектрі масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів виділяють підмасив спектральних складових, що містить складову з екстремальною частотою, та здійснюють його обернене перетворення у відповідний масив відновлених когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів, з якого виділяють підмасив перших його відновлених відліків і виконують його комплексний цифровий спектральний аналіз, потім в отриманому комплексному спектрі визначають комплексну амплітуду спектральної складової з екстремальною частотою, після чого визначають різницю аргументів комплексних амплітуд спектральних складових з екстремальною частотою, що визначені для масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного підмасиву перших відновлених часових відліків сигналів, далі за екстремальною частотою та з урахуванням різниці аргументів відповідних спектральних складових спектрів прийнятих та відновлених відліків сигналів визначають остаточний напрямок на джерело радіовипромінювання.

Винахід належить до галузі радіоелектроніки і може бути використаний в радіоелектронних засобах різного призначення, зокрема в радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії, радіомоніторингу.

Відомий спосіб цифрового радіопеленгування [1], що вибраний як прототип винаходу. В способі-прототипі, як і в заявленому способі, здійснюють вибіркового просторовий прийом радіовипроміню-

вання для сукупності можливих напрямків на його джерело лінійною фазованою антенною решіткою шляхом утворення масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та його цифрового комплексного спектрального аналізу, отримуючи комплексні амплітуди спектральних складових із частотами, що відповідають сукупності можливих напрямків на

(19) UA (11) 97225 (13) C2

джерело радіовипромінювання, та визначають екстремальну частоту, якій відповідає максимальний рівень модуля комплексної амплітуди спектральної складової. З масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів виділяють підмасив перших його відліків і виконують його комплексний цифровий спектральний аналіз, потім визначають комплексну амплітуду спектральної складової з екстремальною частотою, після чого визначають різницю аргументів комплексних амплітуд спектральних складових з екстремальною частотою, що визначені для масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного підмасиву перших відліків, далі за екстремальною частотою та з урахуванням різниці аргументів визначають остаточний напрямок на джерело радіовипромінювання.

Але на відміну від заявленого способу в собі-прототипі підмасив перших відліків виділяють саме з масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів і виконують його комплексний цифровий спектральний аналіз. В результаті цього дисперсія оцінки аргументів комплексних амплітуд спектральних складових спектра сформованого таким чином підмасиву відліків буде суттєвою. Це зумовлено дією шумів та завад, що знаходяться в межах смуги пропускання сусіднього фільтра відносно фільтра з екстремальною частотою при спектральному аналізі масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів. Ці шуми та завади при спектральному аналізі виділеного з нього підмасиву перших відліків попадають в смугу пропускання фільтра з екстремальною частотою, ширина якої значно більша ширини смуги пропускання фільтра з екстремальною частотою при спектральному аналізі всього масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів.

Визначимо дисперсію  $\sigma_{\Delta\theta}^2$  оцінки пеленга для способу-прототипу при дії завад та шумів в межах смуги пропускання сусіднього фільтра відносно фільтра з екстремальною частотою при спектральному аналізі масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів. Як відомо [2], дисперсія  $\sigma_{\Delta\theta}^2$  оцінки пеленга визначається згідно з рівнянням:

$$\sigma_{\Delta\theta}^2 = (\sigma_{\varphi 1}^2 + \sigma_{\varphi 2}^2) \cdot K_{\varphi} = \left( \frac{P_{\text{шз1}}}{2P_S} + \frac{P_{\text{шз2}}}{2P_S} \right) \cdot K_{\varphi}, \quad (1)$$

де:  $\sigma_{\varphi 1}^2$ ,  $\sigma_{\varphi 2}^2$  - дисперсія оцінки аргументів комплексних амплітуд спектральних складових з екстремальною частотою масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного підмасиву перших його відліків відповідно;

$K_{\varphi}$  - коефіцієнт пропорційності;

$P_{\text{шз1}} = N_{\text{ш}} \cdot \Delta F_{\varphi 1} + P_3 \cdot K_{Б1}$  - потужність шумів і завад на виході цифрового аналізатора спектра з екстремальною частотою при обробленні масиву

прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів;

$P_{\text{шз2}} = N_{\text{ш}} \cdot \Delta F_{\varphi 2} + P_3 \cdot K_{Г2}$  - потужність шумів і завад на виході цифрового аналізатора спектра з екстремальною частотою при обробленні виділеного підмасиву перших його відліків;

$N_{\text{ш}}$  - спектральна густина потужності шуму власних шумів пеленгаційних каналів;

$\Delta F_{\varphi 1}$  - ширина смуги пропускання фільтра при спектральному аналізі масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів;

$\Delta F_{\varphi 2} = (Z_1 / Z_2) \cdot \Delta F_{\varphi 1}$  - ширина смуги пропускання фільтра при спектральному аналізі виділеного підмасиву перших відліків;

$Z_1, Z_2$  - величина масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного підмасиву перших відліків відповідно;

$P_3, P_S$  - потужність завади та корисного сигналу відповідно;

$K_{Б1}$  - коефіцієнт підсилення першої бічної пелюстки фільтра при спектральному аналізі масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів;

$K_{Г2}$  - коефіцієнт підсилення головної пелюстки фільтра при спектральному аналізі виділеного підмасиву перших відліків.

Аналіз рівняння (1) показує, що потужність завади  $P_3$  входить до складу  $P_{\text{шз2}}$  з коефіцієнтом  $K_{Г2}$ , що набагато більший коефіцієнта  $K_{Б1}$ , з яким потужність завади  $P_3$  входить до складу  $P_{\text{шз1}}$ . Також і потужність шумів, що входить до складу  $P_{\text{шз2}}$  та дорівнює  $N_{\text{ш}} \cdot \Delta F_{\varphi 2}$ , в  $(Z_1 / Z_2)$  разів більша, ніж потужність шумів, що входить до складу  $P_{\text{шз1}}$  і дорівнює  $N_{\text{ш}} \cdot \Delta F_{\varphi 1}$ . В результаті маємо  $P_{\text{шз2}} \gg P_{\text{шз1}}$ . Отже,  $P_{\text{шз2}}$  суттєво впливає на дисперсію  $\sigma_{\Delta\theta}^2$  оцінки пеленга та погіршує точність радіопеленгування.

Таким чином, недоліком способу-прототипу є недостатня точність радіопеленгування.

В основу винаходу поставлено задачу вдосконалення способу цифрового комплексного радіопеленгування, згідно з яким здійснюють вибірковий просторовий прийом радіовипромінювання для сукупності можливих напрямків на його джерело лінійною фазованою антенною решіткою шляхом утворення масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та його цифрового комплексного спектрального аналізу, отримуючи комплексні амплітуди спектральних складових із частотами, що відповідають сукупності можливих напрямків на джерело радіовипромінювання, та визначають екстремальну частоту, якій відповідає максимальний рівень модуля комплексної амплітуди спектральної складової, з масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів виділяють підмасив перших його відліків і виконують його комплексний цифровий спектральний аналіз, потім визначають комплексну амплітуду спектральної складової з екстремальною частотою, після чого визначають різницю аргументів

комплексних амплітуд спектральних складових з екстремальною частотою, що визначені для масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного підмасиву перших відліків, далі за екстремальною частотою та з урахуванням різниці аргументів визначають остаточний напрямок на джерело радіовипромінювання шляхом того, що після визначення екстремальної частоти в спектрі масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів виділяють підмасив спектральних складових, що містить складову з екстремальною частотою, та здійснюють його обернене перетворення у відповідний масив відновлених когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів, з якого виділяють підмасив перших його відновлених відліків і виконують його комплексний цифровий спектральний аналіз, потім в отриманому комплексному спектрі визначають комплексну амплітуду спектральної складової з екстремальною частотою, після чого визначають різницю аргументів комплексних амплітуд спектральних складових з екстремальною частотою, що визначені для масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного підмасиву перших відновлених часових відліків сигналів, далі за екстремальною частотою та з урахуванням різниці аргументів відповідних спектральних складових спектрів прийнятих та відновлених відліків сигналів визначають остаточний напрямок на джерело радіовипромінювання, щоб забезпечити підвищення точності радіопеленгування.

Поставлена задача вирішується наступним чином.

Після визначення екстремальної частоти в спектрі масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів виділяють підмасив спектральних складових, що містить складову з екстремальною частотою. При цьому спектральні складові шумів та завад сусіднього фільтра відносно фільтра з екстремальною частотою усуваються. Але частина потужності шумів і завад попаде в фільтр з екстремальною частотою через бічну пелюстку. При цьому завадова складова буде дорівнювати  $P_C \cdot K_{A1}$ . Тому потужність шумів і завад  $P_{\text{OC}2}$  в фільтрі з екстремальною частотою при спектральному аналізі підмасиву перших відновлених відліків буде дорівнювати  $P_{\text{OC}1}$  і визначатися як:

$$P_{\text{OC}2} = P_{\text{OC}1} = N_{\text{D}} \cdot \Delta F_{\text{D}1} + P_C \cdot K_{A1}. \quad (2)$$

Визначимо дисперсію  $\sigma_{\Delta\theta}^2$  оцінки пеленга для способу-винаходу при дії завад та шумів в межах смуги пропускання сусіднього фільтра відносно фільтра з екстремальною частотою при спектральному аналізі масиву прийнятих когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів. Дисперсія  $\sigma_{\Delta\theta}^2$  оцінки пеленга для запропонованого способу визначається згідно з рівнянням (1), яке при  $P_{\text{OC}2} = P_{\text{OC}1}$  матиме вигляд:

$$\sigma_{\Delta\theta}^2 = (\sigma_{\varphi 1}^2 + \sigma_{\varphi 2}^2) \cdot K_{\varphi} = \left( \frac{P_{\text{OC}1}}{2P_S} + \frac{P_{\text{OC}1}}{2P_S} \right) \cdot K_{\varphi} = \frac{P_{\text{OC}1}}{P_S} \cdot K_{\varphi}. \quad (3)$$

Порівняльний аналіз рівнянь (1) і (3) показує, що дисперсія оцінки пеленга  $\sigma_{\Delta\theta}^2$  для запропонованого способу буде набагато меншою, ніж для способу-прототипу, що підтверджує досягнення технічного результату при здійсненні заявленого способу.

Заявлений спосіб цифрового комплексного радіопеленгування виконують в такій послідовності.

1. Виконують вибірковий просторовий прийом радіовипромінювання  $S(t)$  для сукупності можливих напрямків на його джерело лінійною фазовою антенною решіткою шляхом утворення масиву  $S_1(n)$  когерентних часових відліків  $n \in [0; N-1]$  вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та його цифрового комплексного спектрального аналізу. При цьому визначають комплексний частотний спектр  $S_1(j\omega_k)$ , наприклад, при використанні алгоритму швидкого перетворення Фур'є, у вигляді масивів значень амплітудного та фазового спектрів:

$$S_1(j\omega_k) = A_1(\omega_k) \cdot \exp(j\varphi_1(\omega_k)), \quad (4)$$

де:  $A_1(\omega_k)$  - масив значень амплітудного спектра масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів;

$\varphi_1(\omega_k)$  - масив значень фазового спектра масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів;

$\omega_k = \frac{2\pi}{T_A \cdot N} \cdot k$  - частота  $k$ -ої спектральної складової,  $k \in [0; N-1]$ ;

$T_A = d$  - період дискретизації радіовипромінювання, що дорівнює кроку  $d$  лінійної фазованої антенної решітки;

$N$  - кількість відліків масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів, що дорівнює кількості каналів лінійної фазованої антенної решітки.

2. Для комплексного частотного спектра  $S_1(j\omega_k)$  визначають екстремальну частоту  $\omega_k$ , якій відповідає максимальний рівень модуля комплексної амплітуди спектральної складової.

3. Для комплексного частотного спектра  $S_1(j\omega_k)$  виділяють підмасив  $S_{\text{Sub}}(j\omega_k)$  спектральних складових, що містить складову з екстремальною частотою  $\omega_k$ .

4. Здійснюють обернене перетворення підмасиву  $S_{\text{Sub}}(j\omega_k)$  спектральних складових у відповідний масив  $S_{1A}(n)$  відновлених когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів.

5. Виділяють підмасив  $S_{2A}(n)$  перших відновлених відліків з масиву  $S_{1A}(n)$  відновлених когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів, наприклад, першої половини його відліків  $n \in \left[ 0; \frac{N}{2} - 1 \right]$ .

6. Для підмасиву  $S_{2A}(n)$  відновлених відліків виконують комплексний цифровий спектральний аналіз та визначають його комплексний частотний спектр  $S_{2A}(j\omega_n)$  за тим же алгоритмом, що і для масиву  $S_1(n)$ , тобто швидкого перетворення Фур'є,

і формують його у вигляді масивів значень амплітудного та фазового спектрів:

$$S_{2\hat{A}}(j\omega_n) = A_{2\hat{A}}(\omega_n) \cdot \exp(j\varphi_{2\hat{A}}(\omega_n)), \quad (5)$$

де:  $A_{2\hat{A}}(\omega_n)$  - масив значень амплітудного спектра виділеного підмасиву відновлених когерентних часових відліків;

$\varphi_{2\hat{A}}(\omega_n)$  - масив значень фазового спектра виділеного підмасиву відновлених когерентних часових відліків;

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_{\hat{A}} \cdot N/2} \cdot n \quad - \text{частота } n\text{-ої спектральної}$$

складової,  $n \in \left[0; \frac{N}{2} - 1\right]$ .

7. Для спектра  $S_{2\hat{A}}(j\omega_n)$  визначають комплексну амплітуду спектральної складової з екстремальним значенням частоти  $\omega_n^* = \omega_k^*$  визначеним для спектра  $S_1(j\omega_k)$ .

8. Визначають різницю аргументів комплексних амплітуд спектральних складових з екстремальною частотою  $\omega_n^* = \omega_k^*$ , що визначені для масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного з відновленого масиву підмасиву перших його відліків:

$$\Delta\varphi = \varphi_1(\omega_k^*) - \varphi_{2\hat{A}}(\omega_n^*). \quad (6)$$

При цьому враховується, що комплексний спектральний аналіз масиву  $S_1(n)$  когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного з відновленого масиву підмасиву перших його відліків  $S_2(n)$  є еквівалентним дії двох - першого та другого наборів цифрових фільтрів відповідно, які характеризуються амплітудно-частотною та фазочастотною характеристиками і частоти настроювання яких відповідають можливим напрямкам. В результаті аргументи комплексних амплітуд частотних складових з екстремальною частотою дорівнюють:

$$\begin{aligned} \varphi_1(\omega_k^*) &= \varphi_0 + \Delta\varphi_1 = \varphi_0 + \Delta\omega \cdot \xi_1 \\ \varphi_{2\hat{A}}(\omega_n^*) &= \varphi_0 + \Delta\varphi_2 = \varphi_0 + \Delta\omega \cdot \xi_2 \end{aligned}, \quad (7)$$

де:  $\varphi_0$  - початкова фаза сигналу на вході фільтра;

$\Delta\varphi_1$  - зсув фази, що визначається значенням фазочастотної характеристики фільтра з екстремальною частотою при спектральному аналізі масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів;

$\Delta\varphi_2$  - зсув фази, що визначається значенням фазочастотної характеристики фільтра з екстремальною частотою при спектральному аналізі виділеного підмасиву перших відновлених відліків;

$\xi_1 = 2\pi/\Delta\omega\delta_1$  - крутизна ФЧХ фільтра, сформованого в результаті обробки масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів;

$\Delta\omega\delta_1 = 2\pi/Nd$  - ширина смуги пропускання першого набору фільтрів;

$\xi_2 = 2\pi/\Delta\omega\delta_2$  - крутизна ФЧХ фільтра, сформованого в результаті обробки виділеного підмасиву перших відновлених відліків;

$\Delta\omega\delta_2 = 4\pi/Nd$  - ширина смуги пропускання другого набору фільтрів;

$\Delta\omega = \omega_n - \omega_s$  - відхилення просторової частоти  $\omega_s$  сигналу від середньої частоти  $\omega_n$  фільтра.

Таким чином, різниця аргументів комплексних амплітуд спектральних складових з екстремальною частотою, що визначені для масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного з відновленого масиву підмасиву перших його відліків односторонньо пов'язана з відхиленням реальної частоти сигналу від попередньої екстремальної частоти:

$$\Delta\varphi = \varphi_1(\omega_k^*) - \varphi_{2\hat{A}}(\omega_n^*) = \Delta\omega \cdot \xi_1 / 2. \quad (8)$$

$$\Delta\omega = 2\Delta\varphi / \xi_1 = 2\Delta\varphi / N \cdot d$$

9. За екстремальною частотою та з урахуванням різниці аргументів  $\Delta\varphi$  відповідних спектральних складових спектрів прийнятих та відновлених відліків сигналів визначають остаточний напрямок на джерело радіовипромінювання. Для цього визначають остаточну просторову частоту  $\omega_s$  сигналу на джерело радіовипромінювання:

$$\omega_s = \omega_k^* + \Delta\omega. \quad (9)$$

Остаточний напрямок на джерело радіовипромінювання дорівнює [3, с. 76]:

$$\theta = \arccos(\omega_s \cdot d / \pi). \quad (10)$$

Таким чином, проведені вдосконалення способу цифрового комплексного радіопеленгування дозволили вирішити поставлену задачу підвищення точності радіопеленгування.

Джерела інформації:

1. Патент України на винахід № 90068, G01S 3/00. Спосіб цифрового комплексного радіопеленгування / Ципоренко В.В., Ципоренко В.Г... - № а200904409; Заявл. 05.05.2009; Опубл. 25.03.2010. - Бюл. № 6.

2. Оптимізація алгоритму комплексного спектрально-кореляційного пеленгування з використанням антенної решітки / Ципоренко В.В. // Вісник ЖДТУ. Технічні науки.-2009. - № IV (51). - С. 186-190.

3. С.Л. Марпл.-мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. - М: Мир, 1990.-584 с, ил.