



УКРАЇНА

(19) UA (11) 90068 (13) C2
(51) МПК (2009)
G01S 3/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ЦИФРОВОГО КОМПЛЕКСНОГО РАДІОПЕЛЕНГУВАННЯ

1

2

(21) а200904409

(22) 05.05.2009

(24) 25.03.2010

(46) 25.03.2010, Бюл.№ 6, 2010 р.

(72) ЦИПОРЕНКО ВАЛЕНТИН ГРИГОРОВИЧ, ЦИПОРЕНКО ВІТАЛІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

(73) ЖИТОМИРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(56) UA 84964 C2, 10.12.2008

RU 2158002 C1, 20.10.2000

RU 2316015 C1, 27.01.2008

US 4170774, 09.10.1979

EP 0520666 A1, 30.12.1992

Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. - М.: Мир, 1988. - С. 488

(57) Спосіб 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 спектрального аналізу і визначають напрямок на джерело за частотою спектральної складової з максимальним рівнем,

який відрізняється тим, що цифровий спектральний аналіз масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів виконують комплексним, отримуючи комплексні амплітуди спектральних складових із частотами, що відповідають сукупності можливих попередніх напрямків на джерело радіовипромінювання, та визначають екстремальну частоту, якій відповідає максимальний рівень модуля комплексної амплітуди спектральної складової, далі 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 з нього підмасиву перших його відліків, далі за екстремальною частотою та з урахуванням різниці аргументів 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, с. 382], що обраний як прототип винаходу. В способі-прототипі, як і в заявленому способі, 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 спектрального аналізу і визначають напрямок на джерело за частотою спектральної складової з максимальним рівнем.

Але на відміну від заявленого способу, в способі-прототипі здійснюють цифровий спектральний аналіз одного масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів приймальних радіоканалів

лінійної фазованої антенної решітки і визначають напрямок на джерело з використанням тільки модуля комплексної амплітуди спектральних складових. В результаті пеленгування здійснюють для усіх можливих напрямків на джерело випромінювання, що зумовлює такий суттєвий недолік, як низька швидкодія.

Таким чином, суттєвим недоліком способу-прототипу є низька швидкодія пеленгування.

Визначимо тривалість $T_{П1}$ процедури пеленгування для способу-прототипу. В способі-прототипі напрямком на джерело випромінювання визначають за частотою просторової спектральної складової прийнятого лінійною фазованою антенною решіткою радіосигналу, яка має максимальний рівень. Для цього аналізують рівень усіх спектральних складових, кількість яких дорівнює кількості можливих напрямків на джерело в межах сектору пеленгування. В результаті тривалість $T_{П1}$ процесу пеленгування визначається кількістю необхідних

(13) C2

(11) 90068

(19) UA

операцій цифрового спектрального аналізу, наприклад, при використанні алгоритму швидкого перетворення Фур'є [2]:

$$T_{П1} = \left(\frac{D_{\theta}}{\Delta\theta} \cdot \log_2 \left(\frac{D_{\theta}}{\Delta\theta} \right) \right) \cdot T_{ОП} \quad (1)$$

де: D_{θ} - величина сектору пеленгування;

$\Delta\theta$ - максимальна похибка пеленгування;

$T_{ОП}$ - тривалість однієї операції спектрального аналізу.

В основу винаходу покладено задачу вдосконалення способу цифрового радіопеленгування шляхом використання комплексного цифрового спектрального аналізу масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів лінійної фазованої антенної решітки та виділеного з нього підмасиву перших його відліків і визначення напрямку на джерело шляхом аналізу модуля та різниці аргументів комплексних амплітуд спектральних складових, в результаті чого пеленгування здійснюють не для усіх можливих напрямків на джерело випромінювання, а для значно меншої сукупності попередніх напрямків з подальшим визначенням остаточного напрямку, щоб забезпечити підвищення швидкодії пеленгування.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі цифрового комплексного радіопеленгування, згідно з винаходом, цифровий спектральний аналіз масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів виконують комплексним, отримуючи комплексні амплітуди спектральних складових із частотами, що відповідають сукупності можливих попередніх напрямків на джерело радіовипромінювання, та визначають екстремальну частоту, якій відповідає максимальний рівень модуля комплексної амплітуди спектральної складової, далі 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 з нього підмасиву перших його відліків, далі за екстремальною частотою та з урахуванням різниці аргументів визначають остаточний напрямок на джерело радіовипромінювання.

Визначимо тривалість $T_{П2}$ процедури пеленгування для способу винаходу. В запропонованому способі напрямку на джерело визначають шляхом комплексного аналізу просторових спектральних складових, але не для усіх можливих напрямків, а для значно меншої їх кількості, що визначається кількістю N приймальних каналів лінійної фазованої антенної решітки. В результаті тривалість $T_{П2}$ процедури пеленгування по запропонованому способу при використанні, наприклад, алгоритму швидкого перетворення Фур'є становить:

$$T_{П2} = \left(\frac{D_{\theta}}{180/N} \cdot \log_2 \left(\frac{D_{\theta}}{180/N} \right) \right) \cdot T_{ОП} \quad (2)$$

Порівняємо вирази (1) та (2). Оскільки максимальна похибка пеленгування $\Delta\theta \ll 180/N$, то тривалість процедури пеленгування запропонованого методу суттєво скорочується у порівнянні зі способом-прототипом: $T_{П2} < T_{П1}$.

Оцінимо вираз γ по швидкодії запропонованого способу, що становить:

$$\gamma = \frac{T_{П1}}{T_{П2}} = \frac{180}{N \cdot \Delta\theta} \cdot \frac{\log_2 \left(\frac{D_{\theta}}{\Delta\theta} \right)}{\log_2 \left(\frac{D_{\theta}}{180/N} \right)} \quad (3)$$

З формули (3) видно, що вираз γ по швидкодії завжди більше одиниці і збільшується зі зменшенням максимальної похибки $\Delta\theta$ пеленгування при обмеженій кількості N каналів лінійної фазованої антенної решітки до величини, що набагато більша одиниці: $1 < \gamma > 1$, при $N=1,2,3,\dots$

Таким чином, запропонований спосіб цифрового комплексного радіопеленгування, що здійснюється для невеликої кількості попередніх напрямків з подальшим визначенням остаточного напрямку, забезпечує скорочення процедури пеленгування з відповідним суттєвим підвищенням швидкодії пеленгування.

Заявлений спосіб цифрового комплексного радіопеленгування виконують в такій послідовності.

1. Виконують вибіркового просторовий прийом радіовипромінювання $S(t)$ для сукупності можливих напрямків на його джерело лінійною фазованою антенною решіткою шляхом утворення масиву $S_1(n)$ когерентних часових відліків $n \in [1, N]$ вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та його цифрового спектрального аналізу та 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 спектру масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів;

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

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T_d \cdot N} \cdot k \quad - \text{частота } k\text{-ї спектральної}$$

складової, $k \in [0; N-1]$,

$T_d = d$ - 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 ω_k^* і відповідний їй екстремальний попередній напрямок, яким відповідає максимальний рівень модуля комплексної амплітуди спектральної складової.

4. Утворюють підмасив $S_2(n)$ відліків шляхом виділення з масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів, наприклад, першої половини його відліків $n \in [1, N/2]$.

5. Для підмасиву $S_2(n)$ відліків визначають його комплексний частотний спектр $S_2(j\omega_n)$ за тим же алгоритмом, що і для масиву, тобто швидкого перетворення Фур'є, і формують його у вигляді масивів значень амплітудного та фазового спектрів:

$$S_2(j\omega_n) = A_2(\omega_n) \cdot \exp(j\varphi_2(\omega_k)) \quad (5)$$

де: $A_2(\omega_n)$ - масив значень амплітудного спектра виділеного підмасиву когерентних часових відліків;

$\varphi_2(\omega_k)$ - масив значень фазового спектра виділеного під масиву когерентних часових відліків;

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_D \cdot N/2} \cdot n - \text{частота } n\text{-ої спектральної}$$

складової, $n \in [0; 0,5 \cdot N - 1]$;

6. Для спектра $S_2(j\omega_n)$ визначають комплексну амплітуду спектральної складової з екстремальним значенням частоти $\omega_n = \omega_k^*$, визначеним для спектра $S_1(j\omega_k)$.

7. Визначають різницю аргументів комплексних амплітуд спектральних складових з екстремальною частотою $\omega_n = \omega_k^*$, що визначені для масиву когерентних часових відліків та виділеного з нього підмасиву перших його відліків:

$$\Delta\varphi = \varphi_1(\omega_k^*) - \varphi_2(\omega_k^*) \quad (6)$$

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

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

де: φ_0 - початкова фаза сигналу на вході фільтра;

$\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ - зсув фази, що визначається значенням фазочастотної характеристики фільтра на екстремальній частоті відповідно масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів та виділеного з нього підмасиву перших його відліків;

$\xi_1 = 2\pi/\Delta\omega_{\phi 1}$ - крутизна ФЧХ фільтра, сформованого в результаті обробки масиву когерентних часових відліків вихідних радіосигналів усіх приймальних радіоканалів;

$\Delta\omega_{\phi 1} = 2\pi/Nd$ - ширина смуги пропускання першого набору фільтрів;

$\xi_2 = 2\pi/\Delta\omega_{\phi 2}$ - крутизна ФЧХ фільтра, сформованого в результаті обробки підмасиву виділених з масиву перших його відліків;

$\Delta\omega_{\phi 2} = 4\pi/Nd$ - ширина смуги пропускання другого набору фільтрів;

$\Delta\omega = \omega_n - \omega_S$ - відхилення просторової частоти ω_S сигналу від середньої частоти ω_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 нього підмасиву перших його відліків однозначно пов'язана з відхиленням реальної частоти сигналу від попередньої екстремальної частоти:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \varphi_1(\omega_k^*) - \varphi_2(\omega_n^*) = \Delta\omega \cdot \xi_1 / 2, \\ \Delta\omega &= 2\Delta\varphi / \xi_1 = 2\Delta\varphi / N \cdot d, \end{aligned} \quad (8)$$

8. З урахуванням різниці аргументів $\Delta\varphi$ та екстремального напрямку визначають остаточний напрямок на джерело радіовипромінювання. Для цього визначають остаточну просторову частоту ω_S сигналу на джерело радіовипромінювання:

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

За остаточною просторовою частотою ω_S сигналу визначають остаточний напрямок на джерело [2, с. 76]:

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

Приклад. Оцінімо виграш по швидкодії запропонованого способу для наступних типових умов: $D_\theta = 180^\circ$, $\Delta\theta = 0,1^\circ$, $N = 64$.

Рішення. Згідно формул (1), (2) та (3) отримуємо відповідно:

$$T_{П1} = 1,98 \cdot 10^4 \cdot T_{ОП}; \quad T_{П2} = 3,84 \cdot 10^2 \cdot T_{ОП}; \quad \gamma = 51,56.$$

В результаті бачимо, що швидкодія запропонованого способу більша ніж на порядок у порівнянні зі способом-прототипом.

Джерела інформації

1. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1988. - 488с., ил.

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