



УКРАЇНА

(19) UA (11) 66902 (13) U

(51) МПК (2011.01)  
G01S 7/36 (2006.01)  
H03D 13/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

ОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальністю  
власника  
патенту

(54) СПОСІБ КОРЕКЦІЇ МІЖКАНАЛЬНИХ І КВАДРАТУРНИХ НЕІДЕНТИЧНОСТЕЙ ПРИЙМАЛЬНИХ КАНАЛІВ ЦИФРОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

1

2

(21) u201107655

(22) 17.06.2011

(24) 25.01.2012

(46) 25.01.2012, Бюл.№ 2, 2012 р.

(72) СЛЮСАР ВАДИМ ІВАНОВИЧ, КОРОЛЬОВ  
МИКОЛА ОЛЕКСІЙОВИЧ, ЦИБУЛЬОВ РОМАН  
АНАТОЛІЙОВИЧ

(73) ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДА  
ЛЬНІСТЮ "СКАЙНЕТ LTD"

(57) 1. Спосіб корекції міжканальних і квадратурних неідентичностей приймальних каналів цифрової антенної решітки (ЦАР), який полягає у тому, що для розрахунку інтегральних коефіцієнтів корекції для кожного г-го приймального каналу ЦАР здійснюють подачу контрольного гармонійного сигналу на входи антенної решітки, розраховують інтегральні коефіцієнти корекції для кожного г-го приймального каналу ЦАР за виразом:

$$p1_r = z_r \cdot p_r \cdot t_r, q1_r = q_r \cdot t_r, p2_r = q_r \cdot z_r, q2_r = p_r \cdot z_r + t_r, \quad (1)$$

де  $q_r, p_r$  - коефіцієнти корекції квадратурного розбалансу,  $z_r, t_r$  - коефіцієнти корекції міжканальних неідентичностей приймальних модулів ЦАР, одночасну корекцію квадратурних і міжканальних неідентичностей виконують по відліках напруг прийнятих сигналів за допомогою розрахованих коефіцієнтів корекції (1) у вигляді:

$$C_r = (A1_r \cdot p1_r + B2_r \cdot p2_r) - (B1_r \cdot q1_r - A2_r \cdot q2_r),$$

$$S_r = (B1_r \cdot p2_r - A2_r \cdot p1_r) + (A1_r \cdot q2_r + B2_r \cdot q1_r),$$

де  $A1_r, A2_r, B1_r, B2_r$  - напруги двох суміжних у часі відліків (з парними й непарними номерами надхо-

дження) по виходах двох квадратурних каналів г-го приймача ЦАР;  $C_r, S_r$  - квадратурні складові відкоригованих напруг сигналів, який відрізняється тим, що як напруги прийнятих сигналів, що використовують для розрахунку інтегральних коефіцієнтів корекції для кожного г-го приймального каналу ЦАР та здійснення безпосередньо корекції прийнятих сигналів, застосовують результати додаткового стробування відліків аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) шляхом часткового підсумовування вихідних кодів АЦП у відведених часових інтервалах (стробах).

2. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що додаткове стробування відліків аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) шляхом часткового підсумовування вихідних кодів АЦП у відведених часових інтервалах (стробах) здійснюють згідно з виразами:

$$A1_r = a_r(0) - a_r(2) + a_r(4) - a_r(6) + a_r(8) - \dots - a_r(N-2),$$

$$A2_r = a_r(1) - a_r(3) + a_r(5) - a_r(7) + a_r(9) - \dots - a_r(N-1),$$

$$B1_r = b_r(0) - b_r(2) + b_r(4) - b_r(6) + b_r(8) - \dots - b_r(N-2),$$

$$B2_r = b_r(1) - b_r(3) + b_r(5) - b_r(7) + b_r(9) - \dots - b_r(N-1),$$

де  $N$  - інтервал накопичення,  $A1_r, A2_r, B1_r, B2_r$  - напруги двох суміжних у часі відліків стробів (з парними й непарними номерами надходження) по виходах двох квадратурних каналів г-го приймача ЦАР,  $a(k), b(k)$  - часові вибірки відліків аналого-цифрового перетворювача на виходах квадратурних каналів г-го приймача ЦАР, що відповідають синфазному і квадратурному підканалам.

Корисна модель належить до галузі цифрової обробки сигналів і може бути використана, наприклад, в радіотехнічних системах з цифровими антенними решітками (ЦАР) для коригування міжканальних і квадратурних неідентичностей їхніх приймальних каналів.

Відомі способи корекції характеристик прийомних каналів цифрових антенних решіток (ЦАР) зазвичай зосереджені на компенсації міжканальних відмінностей в амплітудних і фазочастотних характеристиках [1]. Спеціальні способи корекції

квадратурного розбалансу [2] відрізняються громіздкістю розрахунків, що унеможлиблює їхнє застосування при високочастотній дискретизації сигналів у реальному часі.

Відомий спосіб корекції квадратурного розбалансу приймальних каналів [3], який полягає у тому, що один з квадратурних підканалів призначають у якості еталонного, а інший вважають розбалансованим, в кожен з квадратурних підканалів подають однаковий контрольний сигнал, здійснюють аналого-цифрове перетворення конт-

U  
(13)

66902  
(11)

UA  
(19)

рольного сигналу в кожному з квадратурних підканалів з періодом дискретизації, кратним непарному числу чвертей періоду частоти контрольного сигналу, здійснюють розподіл (сепарацію) відліків АЦП на парні та непарні відліки в кожному з підканалів; для розрахунку коефіцієнтів корекції напруг розбалансованого підканалу застосовують пари напруг сигнальних відліків з обох підканалів згідно з виразами:

$$p = \frac{B1_0 \cdot A1_0 + B2_0 \cdot A2_0}{B1_0 \cdot A2_0 - B2_0 \cdot A1_0};$$

$$q = \sqrt{1 + \left( \frac{B1_0 \cdot A1_0 + B2_0 \cdot A2_0}{B1_0 \cdot A2_0 - B2_0 \cdot A1_0} \right)^2 \left( \frac{B1_0^2 + B2_0^2}{A1_0^2 + A2_0^2} \right)^{-1/2}},$$

де  $A1_0, A2_0, B1_0, B2_0$  - пари відгуків напруг сигналів еталонного та розбалансованого квадратурних підканалів відповідно, що отримані під дією контрольного сигналу на етапі розрахунку коефіцієнтів корекції розбалансу,

далі вимикають контрольний сигнал і переходять до обробки інформаційних сигналів, при цьому корегування кожного з відліків прийнятого сигналу здійснюють лише по виходу підканалу, обраного в якості розбалансованого, лишаючи без змін сигнали еталонного підканалу, а операції коригування поточних пар відліків розбалансованого підканалу виконують за виразами:

$$B1_{кор} = A1 \cdot p + B1 \cdot q,$$

$$B2_{кор} = A2 \cdot p + B2 \cdot q.$$

Недоліком відомого способу є неврахування міжканальних неідентичностей характеристик приймальних каналів ЦАР, наявність некомпенсованих похибок в квадратурних каналах при наявності постійного зсуву напруги нуля АЦП.

Найбільш близьким за сутністю до корисної моделі, що заявляється, є спосіб корекції міжканальних і квадратурних неідентичностей приймальних каналів цифрової антенної решітки (ЦАР) [4], який полягає у тому, що для розрахунку інтегральних коефіцієнтів корекції для кожного  $g$ -го приймального каналу ЦАР здійснюють подачу контрольного гармонійного сигналу на входи антенної решітки, розраховують інтегральні коефіцієнти корекції для кожного  $g$ -го приймального каналу ЦАР за виразом:

$$p1_r = z_r \cdot p_r \cdot t_r, \quad q1_r = q_r \cdot t_r, \quad p2_r = q_r \cdot z_r, \quad p2_r = p_r \cdot z_r + t_r,$$

де  $q_r, p_r$  - коефіцієнти корекції квадратурного розбалансу,  $z_r, t_r$  - коефіцієнти корекції міжканальних неідентичностей приймальних модулів ЦАР, одночасну корекцію квадратурних і міжканальних неідентичностей виконують по відліках напруг прийнятих сигналів за допомогою розрахованих коефіцієнтів корекції (1) у вигляді:

$$C_r = (A1_r \cdot p1_r + B2_r \cdot p2_r) - (B1_r \cdot q1_r - A2_r \cdot q2_r),$$

$$S_r = (B1_r \cdot p2_r - A2_r \cdot p1_r) + (A1_r \cdot q2_r + B2_r \cdot q1_r),$$

де  $A1_r, A2_r, B1_r, B2_r$  - напруги двох суміжних у часі відліків (з парними й непарними номерами надходження) по виходах двох квадратурних каналів  $g$ -го приймача ЦАР;  $C_r, S_r$  - квадратурні складові відкоригованих напруг сигналів,

Спосіб-прототип дозволяє врахувати при усуненні квадратурного розбалансу також наявність міжканальних неідентичностей характеристик приймальних каналів ЦАР.

Недоліком способу-прототипу є складність його застосування при високошвидкісній дискретизації сигналів за допомогою високошвидкісних АЦП у реальному часі, а також наявність некомпенсованих похибок в квадратурних каналах у разі постійного зсуву напруги нуля АЦП.

З урахуванням сказаного, технічне завдання, що вирішується заявленою корисною моделлю, полягає в усуненні впливу постійних зсувів напруг нуля АЦП на якість корекції міжканальних і квадратурних неідентичностей приймальних каналів ЦАР та зменшенні вимог до швидкодії виконання операцій зазначеної сумісної корекції цифрових відліків прийнятих сигналів при їхній обробці в приймальних каналах ЦАР.

Очікуваний технічний результат від заявленої корисної моделі полягає у досягненні інваріантності результатів сумісної корекції міжканальних і квадратурних неідентичностей приймальних каналів ЦАР до постійного зсуву напруги нуля АЦП та у спрощенні апаратної реалізації операцій корекції з темпом надходження цифрових відліків сигналів.

Суть нововведень до корисної моделі порівняно з прототипом полягає у тому, що як напруги прийнятих сигналів, що використовують для розрахунку інтегральних коефіцієнтів корекції для кожного  $g$ -го приймального каналу ЦАР та для здійснення безпосередньо корекції прийнятих сигналів, застосовують результати додаткового стробування відліків аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) шляхом часткового підсумовування вихідних кодів АЦП у відведених часових інтервалах (стробах).

Частковий варіант виконання способу, що заявляється, відрізняється тим, що додаткове стробування відліків аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) шляхом часткового підсумовування вихідних кодів АЦП у відведених часових інтервалах (стробах) здійснюють згідно з виразами:

$$A1_r = a_r(0) - a_r(2) + a_r(4) - a_r(6) + a_r(8) - \dots - a_r(N-2),$$

$$A2_r = a_r(1) - a_r(3) + a_r(5) - a_r(7) + a_r(9) - \dots - a_r(N-1),$$

$$B1_r = b_r(0) - b_r(2) + b_r(4) - b_r(6) + b_r(8) - \dots - b_r(N-2),$$

$$B2_r = b_r(1) - b_r(3) + b_r(5) - b_r(7) + b_r(9) - \dots - b_r(N-1),$$

де  $N$  - інтервал накопичення,  $A1_r, A2_r, B1_r, B2_r$  - напруги двох суміжних у часі відліків стробів (з парними й непарними номерами надходження) по виходах двох квадратурних каналів  $g$ -го приймача ЦАР,  $a(k), b(k)$  - часові вибірки відліків аналого-цифрового перетворювача на виходах квадратурних каналів  $g$ -го приймача ЦАР, що відповідають синфазному і квадратурному підканалам.

Суттєвою відмінністю заявленого способу є застосування результатів додаткового стробування відліків АЦП для розрахунку коефіцієнтів корекції та здійснення коригування за їх допомогою комплексних напруг сигналів.

Суттєвою перевагою заявленого способу порівняно з прототипом є те, що запропонована послідовність операцій дозволяє уникнути впливу постійного зсуву нуля АЦП на якість корекції міжканальних і квадратурних неідентичностей приймальних каналів ЦАР, а також знижує вимоги до швидкодії пристроїв корекції через уповільнення темпу надходження сигнальних відліків завдяки

застосуванню операції додаткового стробування відліків АЦП.

Перевірка працездатності заявленого способу здійснювалась шляхом математичного моделювання сукупності його операцій над сигналами за допомогою програми, розробленої у пакеті MathCad, у разі гаусовської моделі розподілу некорельованого шуму.

Крім того, перевірка ефективності запропонованого способу корекції була здійснена під час морських випробувань експериментальної радіолокаційної станції (РЛС) з цифровою антенною решіткою (ЦАР), описаної у [5]. До складу РЛС входять: приймальна система; передавальна система у складі рупорної антени та твердотілого підсилювача потужності; пристрій відображення інформації на базі комп'ютера. Приймальна система являє собою пасивну ЦАР, що утворена сукупністю підсистем, серед яких слід вказати [5]:

- антенну решітку з 16 лінійок по 4 вертикальних елементи друкованого типу кожна;
- 64-канальний приймальний надвисокочастотний (НВЧ) модуль із 128 квадратурними виходами сигналів проміжної частоти,
- модуль гетеродину та формування контрольного сигналу;
- 128-канальний модуль підсилювачів проміжної частоти;
- блок 128 цифрових приймальних модулів (ЦПМ) зі спецобчислювачем та синхронізатором.

Передавальний пристрій розташовувався на відстані до 6,5 м від приймальної антенної решітки.

Робота досліджуваної РЛС велася у секторах: 18 градусів за кутом місця та  $\pm 30$  градусів за азимутом - в режимі прийому сигналів;  $\pm 15$  градусів за кутом місця та  $\pm 10$  градусів за азимутом - в режимі зондування. При цьому передавач опромінював одразу весь зазначений сектор простору, а прийом відбитих сигналів відбувався одночасно з усіх напрямів в межах сектору роботи приймальної антенної решітки.

У ході проведених випробувань за допомогою застосування запропонованого методу корекції було досягнуте стійке супроводження РЛС з ЦАР всіх повітряних та надводних об'єктів, що перебували в означеному робочому секторі, на максимальній дальності, обумовленій прямою видимістю, зокрема: рухливих та нерухливих човнів, вітрильних й моторних яхт, катерів, суден і кораблів середньої та великої тоннажності. Наприклад, великий протичовновий корабель "Керч" супроводжувався до відстані 34,5 км [5].

Практична реалізація заявленого способу зводиться до застосування у приймачах РЛС з ЦАР цифрових сигнальних процесорів або програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС), наприклад, від фірми Xilinx, за допомогою яких мають виконуватись передбачені заявленим способом операції над цифровими напругами сигналів, отриманими в результаті додаткового стробування відліків аналого-цифрового перетворювачів. В якості АЦП можуть застосовуватись мікросхеми фірми Analog Devices, Texas Instruments тощо.

Джерела інформації:

1. Слюсар В.И., Покровский В.И., Сахно В.Ф. Патент РФ №2103768, H01Q 3/36, G01R 29/10. Способ коррекции амплитудно-фазовых характеристик первичных каналов плоской цифровой антенной решетки. - 1992. - Оpubл. 27.01.98, Бюл. №3.

2. Бобров Д.Ю., Доброжанский А.П., Зайцев Г.В. и др. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС. Часть 1: Принципы разработки. Преобразование сигнала в цифровую форму // Цифровая обработка сигналов. - 2001. - №4. - с. 2-11.

3. Патент України на корисну модель №33257. МПК7 G01S 7/36, H03D 13/00. Спосіб корекції квадратурного розбалансу з використанням додаткового стробування відліків аналого-цифрового перетворювача. // Слюсар В.И., Масесов М.О., Солощев О.М. - Заявка на видачу патенту України на корисну модель №u200802467 від 26.02.2008. - Патент опубліковано 10.06.2008, бюл. №11.

4. Слюсар В.И., Цыбулев Р.А. Метод интегрированной коррекции межканальных и квадратурных неидентичностей приемных каналов антенной решетки ММО. // VII міжнародна науково-технічна конференція студентства і молоді "Світ інформації та телекомунікацій - 2010" (15-16 квітня 2010 р.). - Київ: ДУІКТ. - с. 52-53. - прототип.

5. Slyusar V.I., Nikitin N.N., Shatzman L.G., Korolev N.A., Solostchev O.N., Shraev D.V., Volostchuk I.V., Alesyn A.M., Bondarenko M.V., Grytzenko V.N., Malastchuk V.P. A Marine Testing's Result of Experimental Radar with 64-Channels Digital Antenna Array. // 18th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications (MIKON-2010) and 11th International Radar Symposium (IRS 2010). Conference Proceedings. - Vilnius, Lithuania, June 14-18, 2010. - Pp. 562-564. - [www.slyusar.kiev.ua/MIKON2010.pdf](http://www.slyusar.kiev.ua/MIKON2010.pdf).