

УДК 621.391

В.В. Ольшанський, Є.М.Прокопенко

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ДУТ, Київ

## МЕТОД ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕСТРОЮВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

В роботі розглядається задача оцінювання параметрів сигналів з псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти в залежності від електромагнітної обстановки в каналі зв'язку. Розроблено метод оцінки просторових параметрів джерел радіовипромінювань в умовах впливу завад та завмирань сигналів.

**Ключові слова:** псевдовипадкове перестроювання робочої частоти, антенна решітка, спектральний аналіз.

### Вступ

В останні роки увагу фахівців привертають проблеми приймання радіосигналів з безперервною оцінкою їх якості, а також розробки адаптивних методів і алгоритмів їх обробки. Адаптивні методи дозволяють на основі результатів оцінки реально існуючих у каналі зв'язку завад забезпечувати близькі до оптимальних режими функціонування системи за рахунок автоматичної перебудови алгоритму роботи системи, зміни надмірності повідомлень і сигналів, структури кодерів і декодерів тощо [1–4].

Одним з ефективних методів підвищення завадозахищеності систем і засобів радіозв'язку (ЗРЗ) при впливі навмисних завад є застосування псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ) [5 – 7]. У ЗРЗ з ППРЧ розширення спектра в межах заданої смуги частот здійснюється за допомогою стрибкоподібної зміни частоти сигналу за псевдовипадковим законом, який невідомий постановнику завад. При цьому сигнал займає смугу частот  $\Delta f_c$  значно ширшу в порівнянні зі смугою  $\Delta F_c$ , яка мінімально необхідна для передачі інформації.

Поряд з використанням сигналів ППРЧ в перспективних засобах зв'язку можуть використовуватися просторово-кодовані сигнали [1, 2, 8]. Слід зазначити, що спільне використання частотного та просторового кодування в системах радіозв'язку не тільки підвищує завадозахищеність і пропускну здатність, але й істотно ускладнює радіоконтроль даних систем. Зокрема оцінку просторових параметрів сигналів в даному випадку доводиться здійснювати в умовах завад, які співпадають за частотою і співставні за рівнем. Крім того, в даному випадку кожен із сукупності прийнятих сигналів послідовно виступає в ролі корисного, а решта розглядаються як завади. У цьому зв'язку виникає задача оцінки просторових параметрів багатомірних за частотою і простором сигналів.

**Аналіз останніх робіт** свідчить, що на даний час розроблено достатньо методів оцінки просторових параметрів багаточастотних сигналів з використан-

ням багатоканальних за частотою приймачів [1, 9, 10]. Однак вони непрацездатні за наявності на вході антенної системи сигналів тотожних за частотним спектром. Відомі методи просторового спектрального аналізу сигналів з ППРЧ не дозволяють проводити оцінку параметрів джерел радіосигналів в умовах реальної електромагнітної обстановки при впливі різного роду завад та завмирань сигналів [11, 12].

Тому **метою** роботи є розробка методу оцінки параметрів сигналів з ППРЧ в каналі зв'язку з навмисними завадами.

### Результати досліджень

Розглянемо  $N$ -елементну антенну решітку (АР) довільної конфігурації ( $N$ -вимірний просторовий фільтр), що здійснює приймання  $L$  ( $L \leq N$ ) незалежних вузькосмугових в просторово-часовому сенсі сигналів на фоні гаусівського шуму. Якщо не враховувати взаємних зв'язків антенних елементів, сумарний  $N$ -вимірний вектор сигналів і шумів на виході АР можна подати у вигляді

$$\vec{X}(t) = N\vec{A}_L(t) + \vec{B}(t), \quad (1)$$

де  $\vec{A}_L(t) = [a_1(t)a_2(t)\dots a_L(t)]^T$  –  $L$ -вимірний вектор;

$a_i(t)$  – комплексна обвідна сигналу  $i$ -го джерела;

$N = [\vec{h}_1(t), \vec{h}_2(t), \dots, \vec{h}_L(t)]^T$  –  $(N \times L)$ -матриця;

$\vec{h}_i = [c_{1i}e^{j\phi_{1i}}, c_{2i}e^{j\phi_{2i}}, \dots, c_{Ni}e^{j\phi_{Ni}}]$  –  $N$ -вимірний

вектор, що характеризує просторову структуру  $i$ -го сигналу;  $c_{ki}$  – нормований коефіцієнт посилення  $k$ -го антенного елементу у напрямку приходу  $\Theta_i$   $i$ -го сигналу;  $\phi_{ki}$  – фазовий зсув, обумовлений запізненням  $i$ -го сигналу на виході  $k$ -го антенного елементу по відношенню до точки, прийнятої за фазовий центр АР;  $\vec{B}(t)$  –  $N$ -вимірний вектор шумів,  $t$  – позначення операції транспонування.

Можна показати, що для сигналів з ППРЧ модель  $\vec{A}_L(t) = a_i(t)\vec{h}_i$  справедлива тільки для деякого конкретного значення несучої частоти. При цьому кожна зміна частоти призводить до зміни векто-

ра сигналу  $\vec{h}_i$  і в цьому сенсі еквівалентно стрибко-подібній зміні напрямку приходу сигналу. Іншими словами, протягом часового інтервалу  $\Delta t_f$  ( $\Delta t_f$  – тривалість f-ої частотної позиції) на виходах N антенних елементів спостерігається вектор

$$\vec{A}(t, \Delta t_f) = a(t) \vec{h}_i(\Delta t_f), \quad (2)$$

де  $h_i(\Delta t_f) \in G_h$ ;  $G_h = [h_{a1}, h_{a2}, \dots, h_{aF}]$ ; F – кількість частотних позицій (значень несучих частот  $\omega_{0f}$ );

$$h_{sf} = h(\Theta_a, \omega_{0f}) = h(\Theta_{af}, \omega_0).$$

Зауважимо, що оскільки частоти (а в загальному випадку і величина  $\Delta t_f$ ) змінюються за псевдовипадковим законом, то в виразі (2)  $h_i(\Delta t_f)$  можна інтерпретувати як реалізацію відповідної випадкової величини (випадкову вибірку з множини  $G_h$ ). Природно, що для моделі (2) вектори вагових коефіцієнтів (ВБК), які отримані для детермінованого значення вектора  $\vec{h}_i$ , не є оптимальними і відповідні алгоритми незасосовні. Однак у випадку, коли на вході АР відсутні завади, узгоджена фільтрація корисного сигналу може бути забезпечена за рахунок синхронної зі зміною несучої частоти зміни вектора  $\vec{h}_y$ . В результаті ВБК, що оптимізує вихідне відношення сигнал/шум приймає вигляд [1]

$$\vec{W} = \mu \vec{h}_i(\Delta t_f), h_i(\Delta t_f) = h_a(\Delta t_f). \quad (3)$$

Для реалізації (3) необхідно точно знати всі параметри, що визначають вектор  $\vec{h}_i$ , і крім того – значення несучої частоти, момент зміни несучої частоти і величину  $\Delta t_f$ .

Разом з тим в більшості практичних випадків дана інформація відсутня. Тоді виявляється невизначеність щодо просторових і частотних параметрів сигналів, що призводить до неправильної ідентифікації сигналів до джерел радіовипромінювань.

У даному випадку є доцільним модифікувати оптимізаційну задачу для обчислення ВБК, що оптимізує вихідне відношення сигнал/шум на виході просторового фільтра з метою усунення деструктивного впливу багаточастотних сигналів. Тоді, оптимізаційну задачу для обчислення ВБК, що забезпечує оцінку параметрів багаточастотних сигналів, сформулюємо у вигляді задачі з лінійним обмеженням [3]

$$\min_{\vec{W}} \vec{W}^H \mathbf{R}_{xx} \vec{W}, \mathbf{V}_{yF}^H \vec{W} = \vec{F}, \quad (4)$$

де  $\vec{W}$  – N-вимірний вектор вагових коефіцієнтів;  $\mathbf{R}_{xx}$  – кореляційна матриця (КМ) вхідних сигналів розмірності (NF)×(NF);  $\mathbf{V}_{yF}$  – (N×F) матриця обмежень;  $\vec{F}$  – F-вимірний вектор обмежень, що визначає необхідний вид комплексної частотної характеристики.

Рішення оптимізаційної задачі (5), за аналогією з [4], представимо у вигляді

$$\vec{W}_f = \beta \mathbf{R}_{xxf}^{-1} \vec{V}_{yf}, \quad (5)$$

де  $\vec{V}_{yf}$  – f-й стовпець матриці  $\mathbf{V}_{yF}$ , що інтерпретується як вектор фазирування антеною решітки в заданому напрямку на f-ій частоті;  $\mathbf{R}_{xxf}$  – кореляційна матриця, яка відповідає f-ій частотній позиції.

Тоді, просторові параметри визначаються шляхом пошуку екстремумів спектральної функції  $A_{if}$ , як функції ВБК (5) в заданому діапазоні кутів і частотних позицій

$$\hat{\Theta}(i, f) = \text{extr} A_{if}(\vec{W}_f) = \text{extr}(\vec{W}_f^H \vec{W}_f), \quad (6)$$

$$i = \overline{1, L}, f = \overline{1, F}.$$

Оцінки  $\hat{\Theta}(i, f)$  будуть однозначно визначати просторові параметри щодо широкосмугових L×F сигналів (завад).

Відмінною особливістю виразу (6) є те, що формування кореляційної матриці прийнятих сигналів і обчислення ВБК здійснюється на кожній частотній позиції виявленого широкосмугового сигналу.

Алгоритм реалізації запропонованого методу оцінки параметрів сигналів з ППРЧ подано на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм реалізації запропонованого методу

Вихідними даними для оцінки є параметри антенної решітки і сигналу ППРЧ (кількість антенних елементів, коефіцієнт розширення спектру сигналу, швидкість ППРЧ тощо).

Над сигналами з виходу антенних елементів здійснюється швидке перетворення Фур'є (блок 2). Після цього здійснюється відповідна корекція керуючого вектора, що забезпечує виконання обмеження

$$\mathbf{V}_{yF}^H \vec{W} = \vec{F}$$

для кожного елементарного частотного каналу і фактично виконує функцію визначення комплексної частотної характеристики (блок 4).

Для кожного сигналу оцінюється вибіркова кореляційна матриця (блок 3) у відповідності з виразом

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T-1} \vec{Z}(t) \vec{Z}^H(t)$$

( $T$  – кількість вибірових відліків), обчислюється вектор вагових коефіцієнтів в  $f$ -му елементарному частотному каналі відповідно до виразу (5) (блок 5).

Після цього обчислюється спектральна функція  $A_{if}(\vec{W}_f)$  в заданому діапазоні кутів і обчислення локальних максимумів, які визначають просторові параметри сигналів, що оцінюються.

## Висновки

Таким чином, запропонований метод дозволяє оцінювати просторові параметри джерел радіовипромінювань з псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти в реальній електромагнітній обстановці.

Подальша ідентифікація випромінювань і визначення їх джерел, радіомереж і радіонапрямками може проводитися відомими способами [1, 4, 9].

## Список літератури

1. Голдсмит А. *Беспроводные коммуникации* / А. Голдсмит. – М.: Техносфера, 2011 – 904 с.

2. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневецкий, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

3. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: Підр. для вищ. навч. закл. / В.К. Стеклов та ін. – К.: Техніка, 2004. – 576 с.

4. Коричнев Л.П. *Статистический контроль каналов связи* / Л.П. Коричнев, В.Д. Королев. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.

5. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов и др. . – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.

6. Теорія електричного зв'язку. Ч. 2: Основи теорії завадостійкості, кодування та інформації: Підручник / О.В. Кувшинов, С.П. Лівенцев, О.П. Лежнюк, А.І. Міночкін, Д.І. Могилевич. – К.: ВІПІ НТУУ „КПІ”, 2008. – 286 с.

7. Григорьев В.А. *Сети и системы радиодоступа* / В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Раснаев. – М.: Око-Трендз, 2005. – 384 с.

8. Space-time synchronisation algorithms for UMTS/TDD systems with strong co-channel interference / K. Kopsa, G. Matz, H. Artes, P. Hlawatsch // Proc. IEEE Globecorn 2007, Taipei, Taiwan. – Nov. 2007. – P. 254 – 258.

9. Борисов В.И. *Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход* / В.И. Борисов, В.М. Зинчук. – М.: Радиософт, 2008. – 260 с.

10. Голяницкий И.А. *Математические модели и методы в радиосвязи* / И.А. Голяницкий; под ред. Ю.А. Грамакова. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 440 с.

11. Куприянов А.И. *Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: Учеб. пособие* / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.

12. Владимиров В.И. *Влияние параметров закона распределения отношения помеха-сигнал на входе приемника на вероятность подавления линии радиосвязи* / В.И. Владимиров, Б. Амруш // *Радиотехника*. – 2008. – № 11. – С. 15 – 20.

Надійшла до редколегії 18.04.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.В. Кувшинов, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Державного університету телекомунікацій, Київ.

## МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫМ ПЕРЕСТРАИВАНИЕМ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

В.В. Ольшанский, Е.Н. Прокопенко

*В работе рассматривается задача оценивания параметров сигналов с псевдослучайным перестраиванием рабочей частоты в зависимости от электромагнитной обстановки в канале связи. Разработан метод оценки пространственных параметров источников радиоизлучения в условиях влияния помех и замираний сигналов.*

**Ключевые слова:** псевдослучайное перестроювання рабочей частоты, антенная решетка, спектральный анализ.

## METHOD OF ESTIMATION OF PARAMETERS OF SIGNALS WITH PSEUDOCASUAL ALTERATION OF WORKING FREQUENCY

V.V. Olshanskiy, E.M. Prokopenko

*The task of evaluation of parameters of signals is in-process examined with pseudo casual alteration of working frequency depending on an electromagnetic situation in a communication channel. The method of estimation of spatial parameters of sources of radiations worked out in the conditions of influence of hindrances and stopping beating of signals.*

**Keywords:** pseudo casual alteration of working frequency, array, spectrology.