

УДК 621.37:621.391

А.А. Белокуров<sup>1</sup>, В.С. Кузниченко<sup>1</sup>, С.Г. Рассомахин<sup>2</sup><sup>1</sup>Центральное казенное конструкторское бюро «Протон», Харьков<sup>2</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков

## ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ПАРАМЕТРОВ OFDM СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАДИОМОНИТОРИНГА

Дано краткое описание частотно-временных особенностей OFDM сигналов, определяющих перечень возможных идентификационных признаков. Предложен корреляционный метод оценки основных параметров сложных сигналов в условиях априорной неопределенности, основанный на циклической префиксной структуре комбинированного сигнала в пределах интервала модуляции и осуществляемый по данным цифровых выборок минимального качества. Предложены этапы обработки и пути их реализации. Показаны преимущества предложенного метода по сравнению с традиционными методами спектрального анализа структуры сигналов.

**Ключевые слова:** радиомониторинг, OFDM сигналы, цифровая обработка, взаимная корреляция, система алгебраических уравнений, частотно-временные параметры.

### Введение

**Постановка проблемы.** Построение эффективных систем передачи информации (СПИ) в настоящее время неразрывно связано с проблемой интенсификации использования временного и частотно-энергетического ресурса физических каналов связи. Это объясняется перегрузкой пригодных для радиосвязи участков радиочастотного спектра в условиях постоянно растущего числа одновременно работающих сетей множественного доступа, что обостряет негативное влияние взаимно мешающих факторов [1, 2]. Одним из направлений решения этой проблемы является применение сложных сигналов с комбинированными видами модуляции в сочетании с методами сужения спектра и помехоустойчивым кодированием [3,4]. Достижение разумного компромисса между энергетическими и частотными затратами на передачу возможно на основе совершенствования способов построения переносчиков информации на уровне физического канала. Одним из наиболее распространенных примеров такого решения проблемы является применение сигналов с фазо-частотной модуляцией, использующих наборы гармонических колебаний (поднесущих частот), каждое из которых модулировано по фазе. Обеспечение ортогональности поднесущих частот привело к интенсивному использованию одного из наиболее перспективных видов сигналов – OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Сложность структуры таких сигналов является причиной существенных затруднений при решении задач радиомониторинга. Поэтому совершенствование методов автоматического цифрового анализа многочастотных многофазных сигналов является весьма актуальной задачей.

**Анализ последних исследований.** Одним из направлений повышения эффективности процессов анализа параметров и структуры сложных сигналов в условиях априорной неопределенности является применение цифровых методов обработки в области низких частот. Это дает возможность использовать для анализа и демодуляции сигналов эффективные математические методы, которые обеспечивают приемлемые по точности результаты.

Традиционным методом первичного выявления параметров контролируемых сигналов в настоящее время является их анализ на основе алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) [5]. Использование алгоритмов БПФ для обработки OFDM сигнала предполагает наличие точной информации на приемной стороне о ряде параметров сигнала: количестве уровней квантования, частоте дискретизации, величине тактового интервала и длительности префикса.

При решении задач радиомониторинга эти данные, как правило, неизвестны.

В связи с этим, развитие программно-аппаратных средств цифровой обработки сигналов, ориентированных только на использование алгоритмов БПФ не всегда является оправданным.

**Целью статьи** является определение путей цифрового анализа первичных параметров OFDM сигналов в системах автоматического радиомониторинга, определение этапов обработки и рекомендаций относительно их реализации.

### Основная часть

Произвольный OFDM сигнал  $S_j(t)$  на  $j$ -м интервале модуляции длительностью  $T_p$  формируется путем суммирования нескольких гармонических колебаний одинаковой амплитуды, каждое из кото-

рых имеет  $m$  вариантов модуляционного фазового сдвига. Величина  $m$  определяет кратность используемой фазовой (ФМ) или относительно-фазовой (ОФМ) манипуляции и соответствует основанию кода источника.

Обычно  $m = 2^k$ , где  $k$  – число двоичных символов (бит) на одном интервале модуляции в канале.

При использовании ОФМ и единичном значении амплитуды поднесущих колебаний математическая модель сигнала может быть представлена в следующем виде:

$$S_j t = \sum_{i=0}^{n-1} \sin \left\{ 2\pi \left( f_0 + \frac{i}{T} \right) \cdot \left( t - T_p \left\lfloor \frac{t}{T_p} \right\rfloor \right) + \varphi_{j,i} \right\}, \quad (1)$$

где  $t$  – текущее время;

$f_0$  – низшая поднесущая частота в спектре сигнала;  $T = 1/\Delta f$  – величина, обратная минимальному разному (интервалу ортогональности по частоте  $\Delta f$ ) поднесущих частот;

$n$  – число используемых поднесущих;

$\varphi_{j,i}$  – значение манипуляционного угла  $i$ -го поднесущего колебания на  $j$ -м интервале модуляции;

знак  $\lfloor \cdot \rfloor$  – означает округление к ближайшему меньшему целому числу.

Информативными признаками такого сигнала являются относительные скачки фаз между отрезками гармонических колебаний на соседних интервалах модуляции, измеренные для каждой из поднесущих частот в отдельности:

$$\varphi_{j,i} - \varphi_{j-1,i}, \quad i = 0, \dots, n-1.$$

Временные параметры интервала модуляции связаны между собой соотношением:

$$T_p = T + \Delta T = \frac{1}{\Delta f} + \Delta T, \quad (2)$$

где  $\Delta T$  – длительность префиксной части сигнала. Префиксная часть (в дальнейшем – префикс) является повторяющейся (с точностью до знака) начальной частью сигнала, добавляемой в конце интервала модуляции  $T_p$ .

Данное циклическое продолжение сигнала необходимо для борьбы с неравномерным запаздыванием поднесущих колебаний различных частот при многолучевом распространении радиоволн и сбоях синхронизации. Обычно выбор продолжительности префикса на интервале модуляции соответствует соотношению  $\Delta T = 0,1 \div 0,5 T$ .

Знак префикса определяется значением следующего функционала

$$P = f_0 \bmod \Delta f. \quad (3)$$

Для существующих стандартов OFDM функционал (3) может принимать два значения, определяющих знак циклического префикса: при  $P = 0$  префикс положительный, а при  $P = \Delta f/2$  – инверсный.

Рис. 1 дает качественное представление об огибающей сигнала, построенной в соответствии с моделью (1) для произвольных допустимых значений фазовых манипуляционных углов на двух соседних интервалах модуляции при  $n = 16$ ,  $T_p = 1,47 \cdot T$ .

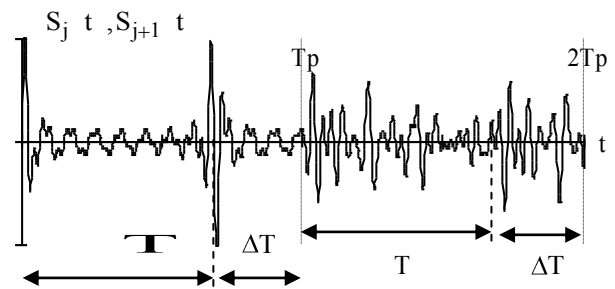


Рис.1. Огибающая OFDM сигнала.

В конце каждого из интервалов  $T_p$  расположено инверсное циклическое продолжение сигнала длительностью  $\Delta T$ , повторяющее с точностью до знака форму начального отрезка сигнала на интервале модуляции. Для рассматриваемого примера  $P = \Delta f/2$ , поэтому префиксная часть является инверсией начальной части сигнала.

Без использования префикса корректная демодуляция OFDM сигналов в реальных каналах с помехами и многолучевостью затруднена, поэтому наличие префикса (циклического продолжения) является обязательным и может считаться основным идентифицирующим признаком сигналов данного типа. Для облегчения процессов обработки в состав OFDM сигналов могут входить, служебные частоты, предназначенные для передачи "пилот-сигнала" (без фазовых скачков), а также синхронизирующей последовательности регулярных скачков фазы на  $\pi$ . Однако во многих случаях эти компоненты сигналов отсутствуют и не могут быть использованы для идентификации вида и параметров модуляции.

С учетом (1) принятый сигнал можно представить в виде

$$y(t) = S t + n(t), \quad (4)$$

где  $n(t)$  – аддитивная смесь помех канала связи и приемного устройства.

Аналізу подвергается цифровая выборка сигнала (4) и требуется по последовательности измеренных значений сигнала в виде одномерного массива чисел  $Q = q_0, q_1, \dots$  оценить значение набора параметров модели (1).

В рассмотренной математической модели основными структурными временными параметрами OFDM сигналов, открывающими доступ к дальнейшему анализу всех идентифицирующих признаков, являются значения продолжительности интервала модуляции  $T_p$  и интервала ортогональности  $T$ . Решение задачи оценки этих величин производится при следующих условиях:

- априорно справедлива гипотеза о принадлежности анализируемого сигнала к классу OFDM;

- известна эффективная ширина спектра сигнала  $F_{эф}$  (например, можно считать, что энергия низкочастотной огибающей сигнала сосредоточена в пределах СКТЧ);

- для анализа доступна цифровая выборка сигнала, представленная массивом  $N$ -битовых измерений, выполненных с частотой дискретизации  $f_d$ , причем значения  $N$  и  $f_d$  известны и близки к теоретически допустимому минимуму (например, для полосы СКТЧ  $N=8$ ,  $f_d = 8кГц$ );

- цифровая выборка формируется асинхронно по отношению к огибающей сигнала, т.е. случайный момент времени начала наблюдения, соответствующий первому измерению в массиве выборки, распределен равномерно в пределах интервала модуляции;

- интервал дискретизации  $t_d = f_d^{-1}$  меньше интервала модуляции  $t_d < T_p$ , однако, соотношение между ними может быть произвольным;

- длина выборки, по которой необходимо произвести оценку параметров, соответствует продолжительности достаточно большого, но ограниченно числа интервалов модуляции (например, для СКТЧ определим это условие ограничением интервала наблюдения сигнала величиной  $1 \div 2$  с).

Совокупность указанных условий является чрезвычайно "жесткой" и предопределяет выполнение анализа сигнала в условиях экстремально трудных ограничений. При этом непосредственный анализ огибающей сигнала с целью выявления границ тактовых интервалов невозможен, так как дискретизация с предельно низкой частотой (близкой к частоте Найквиста) может маскировать разрывы огибающей.

Отсутствие априорных данных о частотно-временной структуре сигнала также не дает возможности произвести сглаживание (интерполяцию) и фазовую демодуляцию.

Для выявления первичных параметров в подобных случаях традиционно используется спектральный анализ на основе БПФ [5].

Однако точное определение временных параметров через характеристики спектра в условиях

множества несущих, многократно модулированных по фазе, даже при очень большой частоте дискретизации обречено на неудачу.

Для анализа OFDM сигналов в условиях цифровых выборок с низким разрешением могут быть предложены два подхода.

К первому отнесем методы оценивания сигналов неизвестной структуры [6].

Под структурными параметрами модели будем понимать ее размерность – целочисленный параметр числа поднесущих частот  $n$ , значения продолжительности интервала модуляции  $T_p$  и интервала ортогональности  $T$ .

В более широком смысле под структурой (структурными параметрами) понимаем в дополнение к перечисленным нечисловые параметры: тип сигнала (с пилотом-тоном или без и т.д.)

Существенной особенностью рассматриваемой модели является необходимость оценивания целочисленного параметра числа поднесущих частот, по которому нельзя дифференцировать функцию плотности вероятности и поэтому, традиционные методы оценивания неприменимы.

В этой ситуации могут быть использованы модификации метода максимального правдоподобия для случая неизвестной размерности модели. Одной из таких модификаций является информационный критерий Акаике (ИКА) [6].

Таким образом, задача идентификации сводится к заданию множества допустимых моделей и множества допустимых времен начала регистрации интервалов модуляции и оцениванию параметров каждой модели методом максимального правдоподобия с последующим выбором модели, обладающей минимальным значением ИКА.

Информационный критерий Акаике представляет собой аддитивную поправку к условной функции правдоподобия, зависящую от размерности модели.

Для предложенной модели она имеет вид

$$\text{ИКА}[n, A(n)] = -\ln f(Q/n, A(n)) + n, \quad (5)$$

где  $f(Q/n, A(n))$  – функция правдоподобия для реализации  $Q$  при фиксированной структуре модели ( $n$ ),

$A(n) = [T, T_p, \Delta f, \vec{F}]$  – искомая совокупность оцениваемых вторичных параметров для фиксированного набора первичных параметров ( $n$ ),

$\vec{F} = f_1, \dots, f_n$  – вектор номиналов поднесущих частот.

Процедура минимизации ИКА заключается в нахождении оценок максимального правдоподобия для каждого набора первичных параметров ( $n$ ) с последующим выбором набора ( $n$ ), обеспечивающего минимальное значение ИКА в заданном интервале.

Алгоритм работает следующим образом.

Для каждого значения размерности модели  $n$  и для заданных временных интервалов "запускается" алгоритм оценивания параметров модели методом максимального правдоподобия, при этом не только оценивается набор параметров  $A(n)$  для данной размерности  $n$ , но и фиксируется достигнутое значение логарифмической функции правдоподобия

$$\ln f(Q/n, A(n)).$$

После этого вычисляются значения информационного критерия Акаике и находится искомая оценка размерности по критерию (5).

Рассмотренный подход требует чрезвычайно больших вычислительных ресурсов, возрастающих в геометрической прогрессии с возрастанием числа и возможных значений переменных. Поэтому его реализация в реальном масштабе времени в системах автоматического радиомониторинга является весьма проблематичной.

Ко второму подходу отнесем методы поэтапной обработки, когда на каждом из этапов определяется часть параметров, а не вся их совокупность.

Учитывая тот факт, что OFDM сигналы содержат префикс, на первом этапе целесообразно использовать корреляционный метод определения структурных временных параметров  $T_p$  и  $T$ , в основу которого положен принцип «скользящего» временного окна.

Для проведения корреляционного анализа формируются два временных окна наблюдения сигнала и содержащие по  $K$  неперекрывающихся элементов массива

$$Q : \bar{Y}0 = q_j, q_{j+1}, \dots, q_{j+K-1},$$

$$\bar{Y}1 = q_{j+i+K}, q_{j+i+K+1}, \dots, q_{j+i+2K-1},$$

отстоящих на величину  $L$ .

Определение структурных временных параметров осуществляется на основе расчета нормализованной функции взаимной корреляции сигнала в окнах:

$$M(d, L) = \frac{\sum_{m=d}^{d+K-1} q(m) \cdot q(m+L)}{\sum_{m=d}^{d+K-1} |q(m)|^2 \cdot \sum_{m=d}^{d+K-1} |q(m+L)|^2}. \quad (6)$$

Оценка величин  $d$  и  $L$  осуществляется по следующей формуле:

$$\hat{d}, \hat{L} = \arg \max_{d, L} M(d, L). \quad (7)$$

Решение задачи дает возможность определить с ошибкой, не превышающей величину интервала дискретизации параметры OFDM сигнала: величину интервала ортогональности, длительность интервала

модуляции и значение разноса частот между каналами.

Найденные частотно-временные параметры сигнала являются основой для решения следующих задач:

- тактовой (временной синхронизации);
- частотной синхронизации;
- определения количества и значений частот информационных (доплеровских, синхронизации) каналов;
- демодуляции сигнала (расчет фазы и амплитуды сигнала на тактовых интервалах);
- определения количества позиций фаз информационных каналов;
- расчета значения отношения сигнал/шум.

Временная синхронизация заключается в корректном определении позиций элементов из массива  $Q$ , соответствующих началу каждого тактового интервала (интервала модуляции).

Начало тактового интервала правильнее всего положить связанным с началом серии максимальных откликов коррелятора (6,7).

С учетом этого может быть определено максимальное число колебаний в полосе  $F_{эф}$  может быть разложено по двум квадратурным компонентам. Учитывая, что поднесущие частоты могут принимать значения, начиная от  $f_n$  с шагом  $\Delta f$ , нахождение амплитуд квадратур проще и надежнее всего организовать при помощи решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Преимущество использования метода линейной алгебры по сравнению с традиционными спектральными методами состоит в том, что вычислительная сложность решения СЛАУ (например, методом Гаусса) не превышает вычислительной сложности быстрого преобразования Фурье.

При решении СЛАУ фактически выполняется разложение сигнала в ряд Фурье на интервале модуляции по гармоникам, точно совпадающим со значениями поднесущих частот сигнала.

Для нахождения вектора номиналов работающих частот

$$\vec{F} = f_1, \dots, f_{n_p}$$

можно использовать различные способы составления и решения СЛАУ, что не является предметом анализа этой статьи.

На следующем этапе применение аппарата СЛАУ позволит осуществить демодуляцию сигнала в каждом из предполагаемых частотных каналов. Оценка уровня сигнала в каждом канале и расчет «фазового созвездия» будут основой для принятия решения о количестве информационных каналов (доплеровских, синхронизации), определения значений частот этих каналов.

Таким образом, полученные параметры на основе обработки цифровых выборок малого объема и низкого качества, дают возможность полностью идентифицировать структуру OFDM сигнала.

### Выводы и направления дальнейших исследований

Основной результат данной статьи заключается в получении универсального метода комплексного анализа структурных параметров OFDM сигналов. В отличие от известных спектральных методов, в данном методе предложено использование корреляционных свойств префиксной структуры многочастотных сигналов и помехоустойчивых решений перепределенных систем уравнений.

Этот подход позволил добиться полной структурной идентификации сигнала в условиях обширной неопределенности и цифровой выборки минимального объема и весьма невысокого качества.

Фактически, становится возможной помехоустойчивая демодуляция сигналов в цифровой форме при предельно низкой частоте дискретизации и малом разрешении квантователей.

Дальнейшим направлением исследований является применение рассмотренного метода для выявления информативных признаков и демодуляции сигналов в системах радиомониторинга.

### Список литературы

1. Вишневецкий В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневецкий, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / В.А. Григорьев, О. Лагутенко, Ю. Распаев. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.
3. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер; пер. с англ. под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
5. Степанов В.В. Компьютерный анализ сигналов систем радиосвязи / В.В. Степанов, А.А. Матвеев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 207 с.
6. Воробьев С.А. Моделирование и структурный анализ сигналов с повторяющимися признаками формы в медико-биологическом эксперименте: автор. дис. докт. техн. наук [Электронный ресурс] / С.А. Воробьев. – Режим доступа к автореферату: <http://vorobei.narod.ru>.

Поступила в редколлегию 15.09.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаев, Национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков.

### ЦИФРОВИЙ КОРЕЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ OFDM СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РАДІОМОНІТОРИНГУ

О.О. Білокуров, В.С. Кузніченко, С.Г. Рассомахин

*Наданий короткий опис частотно-часових особливостей OFDM сигналів, який дозволяє визначити перелік можливих ідентифікаційних ознак. Запропонований кореляційний метод оцінки основних параметрів складних сигналів в умовах апріорної невизначеності, заснований на циклічній префіксній структурі комбінованого сигналу в межах інтервалу модуляції, який здійснюється за даними цифрових вибірок мінімальної якості. Для визначення списку робочих ортогональних частот запропонований метод лінійної алгебри, що забезпечує підвищену точність оцінок при мінімумі обчислювальних витрат. Показані переваги запропонованого методу в порівнянні з традиційними методами спектрального аналізу структури сигналів.*

**Ключові слова:** радіомоніторинг, OFDM сигнали, цифрова обробка, взаємна кореляція, система рівнянь алгебри, частотно-часові параметри.

### A DIGITAL CROSS-CORRELATION METHOD OF ANALYSIS OF PARAMETERS OF OFDM SIGNALS IS IN THE SYSTEMS OF THE AUTOMATIC RADIO MONITORING

A.A. Belokurov, V.S. Kuznichenko, S.G. Rassomakhin

*Short description of frequency-temporal features of OFDM of signals, determining the list of possible identification signs is given. The cross-correlation method of estimation of basic parameters of difficult signals is offered in the conditions of a priori vagueness, based on the cyclic prefix structure of the combined signal within the limits of interval of modulation and carried out from data of digital selections of minimum quality. For determination of list of workings orthogonal sub bearings frequencies the method of linear algebra, providing enhanceable exactness of estimations at a minimum of calculable expenses, is offered. Advantages of the offered method are rotined as compared to the traditional methods of spectral structure of signals.*

**Keywords:** radiomonitoring, OFDM signals, digital treatment, cross-correlation, system of algebraic equalizations, frequency-temporal parameters.