

УДК 621.37:621.391

А.А. Белокуров

Государственное предприятие "Центральное конструкторское бюро "Протон", Харьков

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ OFDM СИГНАЛОВ С ИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Дано краткое описание особенностей OFDM сигналов, определяющих перечень возможных идентификационных признаков. Усовершенствован корреляционный метод оценки основных параметров сигналов, основанный на циклической префиксной структуре сигнала, за счет привязки начал интервалов ортогональности к эталонной сетке частот. Моделированием показана возможность помехоустойчивой демодуляции сигналов на основе решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Ключевые слова: OFDM сигналы, префикс, цифровая обработка.

Введение

Актуальность проблемы. Одним из направлений повышения эффективности систем передачи информации (СПИ) является применение сложных сигналов с комбинированными видами модуляции в сочетании с методами сужения спектра и помехоустойчивым кодированием [1, 2]. Наиболее характерным примером такого решения проблемы является применение сигналов с фазово-частотной модуляцией, использующих наборы гармонических колебаний (поднесущих частот), каждое из которых модулировано по фазе. Обеспечение ортогональности поднесущих частот привело к созданию одного из наиболее перспективных видов сигналов – OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) широко распространено при построении современных телекоммуникационных систем. Сложность структуры таких сигналов является причиной существенных затруднений при решении специальных задач анализа таких сигналов. Поэтому совершенствование методов автоматического цифрового анализа многочастотных многофазных сигналов является весьма актуальной задачей.

Анализ последних исследований. При приеме OFDM-сигналов особенно важна точная синхронизация приемника и передатчика во времени и по частоте. Успешное решение этой задачи позволяет в значительной степени повысить помехоустойчивость приемника. Вопросам синхронизации OFDM-систем посвящено множество исследований. Также ведется синтез новых и оптимизация известных алгоритмов в плане повышения рабочих характеристик и возможности аппаратной реализации. Существующие в настоящее время алгоритмы можно разделить на две основные группы. Первая предполагает анализ сигнала во временной [1 – 3], а вторая – в частотной области [4, 5].

В [6] проведен сравнительный анализ наиболее распространенных алгоритмов синхронизации как во

временной, так и в частотной областях с точки зрения точности и затрат на аппаратную реализацию. Показано, что алгоритмы синхронизации во временной области требуют больших аппаратных затрат и позволяют добиться менее высокой точности оценок, из-за чего они применяются лишь на этапе грубой оценки временного и частотного рассогласования, а для точной оценки следует использовать алгоритмы, функционирующие в частотной области.

Поскольку полностью избежать использования алгоритмов синхронизации во временной области нельзя, в дальнейшем рассматриваются только они. Традиционным методом первичного выявления параметров контролируемых сигналов в настоящее время является их анализ на основе алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) [1]. Однако анализ сигналов сложной структуры (в частности, OFDM сигналов) требует высокого качества оцифровки выборок. Это является причиной большого объема вычислительных затрат при обработке цифровых выборок и, как следствие, приводит к снижению точности обработки сигналов в реальном временном масштабе. В отличие от известных спектральных методов, в [7] предложено использование корреляционных свойств префиксной структуры многочастотных сигналов и помехоустойчивых решений переопределенных систем уравнений. Этот подход позволил добиться полной структурной идентификации сигнала в условиях обширной неопределенности и цифровой выборки минимального объема и весьма невысокого качества. Однако при известных параметрах принимаемого сигнала имеется возможность повышения точности оценки параметров и уменьшения вычислительных затрат. Именно этому аспекту уделяется основное внимание в настоящей статье.

Целью статьи является совершенствование метода автоматического цифрового анализа первичных параметров известных OFDM сигналов, основанного на корреляционных свойствах циклической префиксной структуры таких сигналов, за счет привязки на-

чал интервалов ортогональности к эталонной сетке частот, а также их демодуляция на основе решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Основная часть

Произвольный OFDM сигнал $S_j(t)$ на j -м интервале модуляции длительностью T_p при единичном значении амплитуды поднесущих может быть представлен в 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 разносу (интервалу ортогональности по частоте Δf) 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 в сигнале являются относительные скачки фаз между отрезками гармонических колебаний на соседних интервалах модуляции, измеренные для каждой из поднесущих частот в отдельности: $\varphi_{j,i} - \varphi_{j-1,i}$, $i = 0, \dots, n-1$. Временные параметры интервала модуляции, использованные в модели (1), связаны между собой соотношением:

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

где K – длительность префиксной части сигнала. Префиксная часть (префикс) является повторяющейся (с точностью до знака) начальной частью сигнала, добавляемой в конце интервала модуляции T_p . Префикс необходим для борьбы с неравномерным запаздыванием поднесущих колебаний различных частот при многолучевом распространении радиоволн и сбоях синхронизации.

В модели (1) основными структурными временными параметрами OFDM сигналов являются значения продолжительности интервала модуляции T_p и интервала ортогональности T . Как и в [7] рассмотрим корреляционный метод синхронизации по принципу "скользящего временного окна". В отличие от [7] процедура вычисления взаимной корреля-

ции между отрезками цифровой выборки осуществляется при полностью известных временных параметрах OFDM сигналов и иллюстрируется на рис. 1. Последовательность измеренных значений сигнала рассматривается в виде одномерного массива $Q = \{q_0, q_1, \dots, q_{L-1}\}$, содержащего L чисел. Для проведения корреляционного анализа формируются два вектора, характеризующие два временных окна наблюдения сигнала и содержащие по K неперекрывающихся элементов массива Q :

$$\overline{Y0} = \{q_{j+K}, q_{j+K+1}, \dots, q_{j+2K-1}\},$$

$$\overline{Y1} = \{q_{j+T+K}, q_{j+T+K+1}, \dots, q_{j+T+2K-1}\}.$$

Положение временных окон, соответствующих данным векторам, определяется последовательным изменением индекса j при каждом из значений $j = 0 \dots L$. При каждом значении индекса j производится расчет коэффициентов взаимной корреляции векторов $\overline{Y0}$ и $\overline{Y1}$:

$$v_j = \frac{\overline{Y0} \times \overline{Y1}}{|\overline{Y0}| \cdot |\overline{Y1}|}. \quad (3)$$

Знак "x" в (3) обозначает операцию скалярного произведения. В дальнейшем рассмотрим процесс обработки на примере реальной записи OFDM сигнала, содержащего 12 поднесущих информационных частот (ОФМ-4), частота начальной поднесущей $f_0 = 700$ Гц, $\Delta f = 1/T = 200$ Гц, а скорость модуляции составляет $W_m = 1/T_p = 30$ Бод. Параметрами цифрового преобразования сигнала в массив Q являются: частота дискретизации $f_d = 8$ КГц, рядность преобразования $N = 8$ бит. Наблюдение сигнала осуществлено в присутствии естественных помех, складывающихся с шумом квантования. Результаты вычислений (3) при $j = 0 \dots L$ для реального сигнала приведены на рис. 2. По этим данным можно сформировать массив $\overline{X} = \{x_0, x_1, \dots, x_L\}$, содержащий значения коэффициентов взаимной корреляции для каждого периода дискретизации.

По данным этого массива легко определяется периодичность максимумов корреляции и начало каждого интервала модуляции. Однако они будут содержать ошибки, вызванные шумовой составляющей входного сигнала и аналого-цифровым преобразованием сигнала, которое не согласовано (не кратно) интервалам T и T_p .

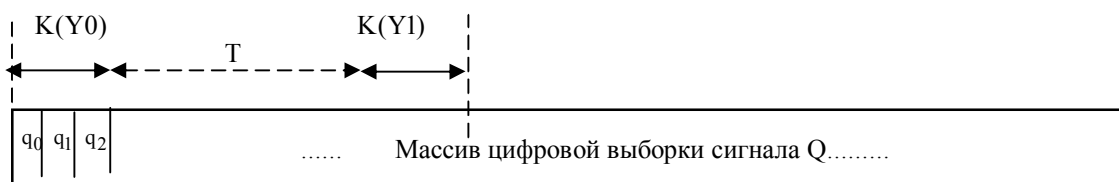


Рис. 1. Схема вычислений по методу "скользящего временного окна"

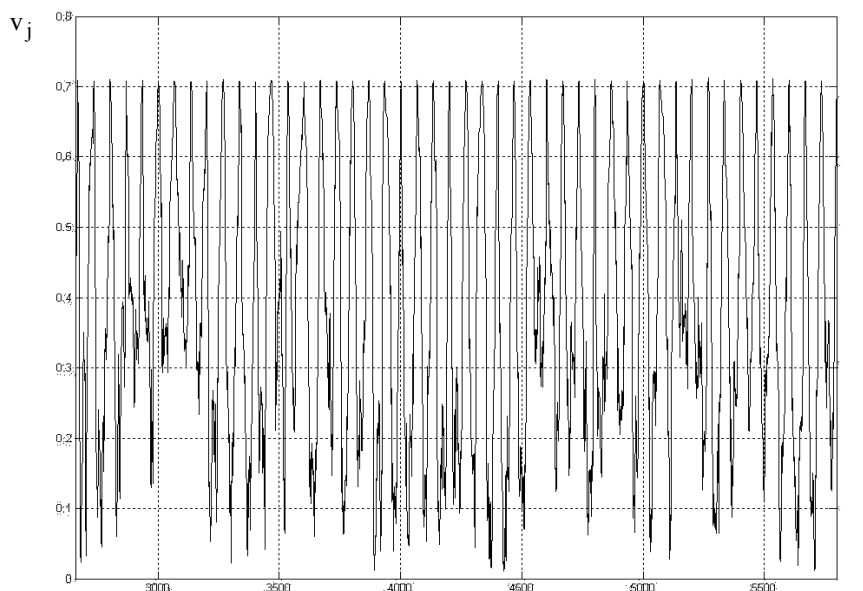


Рис. 2. Результат вычисления коэффициентов корреляции принятого сигнала

Следовательно, число и относительное положение отсчетов в выборке Q , соответствующих одному интервалу модуляции, может изменяться при переходе от интервала к интервалу.

В связи с этим, для проведения корректной демодуляции OFDM сигнала необходимо как можно точнее определить моменты передачи информационного символа (но не во время передачи префикса, следующего перед ним). С этой целью целесообразно сформировать эталонную сетку импульсов и к ней привязать начала интервалов ортогональности.

Форма импульсов может быть прямоугольной или в виде гауссоид на основе следующих выражений:

$$F(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \in [jT_p \pm \varepsilon], \\ 0, & \text{при } t \notin [jT_p \pm \varepsilon], \end{cases} \quad j = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \sum_{j=0}^{m-1} \exp\left(-\frac{(t - jT_p)^2}{2\sigma^2}\right), \quad j = 0, 1, 2, \dots, m,$$

где m – количество импульсов с интервалом модуляции T_p , ε, σ – величины, определяющие ширину импульса. На основе (4) формируется вектор $Z = \{z_0, \dots, z_L\}$, элементы которого представлены с частотой дискретизации f_d $z_i = F(m, i)$, $i = 0, \dots, L$.

Для каждого значения сдвига i вычисляется коэффициент взаимной корреляции: $r_i = (X \times Z) / (|X| \cdot |Z|)$, где знак " \times " обозначает скалярное произведение. Индекс максимального из найденных значений $R_m = \max(r_i)$ принимается за начало интервала модуляции. Описанный вычислительный процесс вычисления корреляционной близости удобно реализуется с помощью механизма вложенных циклов, технологичен для программирования и, как показали многочисленные испытания,

гарантирует правильное нахождение начала интервала модуляции даже в условиях существенных искажений выборок сигналов.

Далее необходимо обеспечить локализацию в выборке защитных интервалов и интервалов ортогональности исходного сигнала. Это можно сделать либо прямым подсчетом интервалов дискретизации от начала интервала, либо вычислив разности между отсчетами исходного сигнала, представленными в комплексной форме, и отсчетами этого же сигнала, сдвинутыми по времени на величину интервала ортогональности.

Известные структурные параметры сигнала и имеющаяся оценка границ интервалов модуляции на последовательности отсчетов выборки Q позволяют выполнить демодуляцию сигнала для одного интервала. Для этого можно использовать решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с прямоугольной матрицей коэффициентов [8]. Число искомых неизвестных в системе уравнений равно $2n$ – общему удвоенному количеству гармонических несущих (числу квадратурных компонент) в составе сигнала, а число уравнений определяется максимально возможным количеством элементов выборки Q , размещающихся в пределах одного интервала ортогональности.

Результаты демодуляции рассмотренного сигнала для поднесущей 1300 Гц представлены на рис. 3 для случаев привязки к эталонной сетке частот и её отсутствия. Очевидно, что рис. 3, б позволяет сделать однозначный вывод о применении в анализируемом сигнале 4-х кратной OFM, в то время как на рис. 3, а моды распределения фазовых углов не совпадают с ожидаемыми при OFM-4 значениями фазовых приращений.

Аналогично выглядят результаты демодуляции по другим поднесущим частотам.

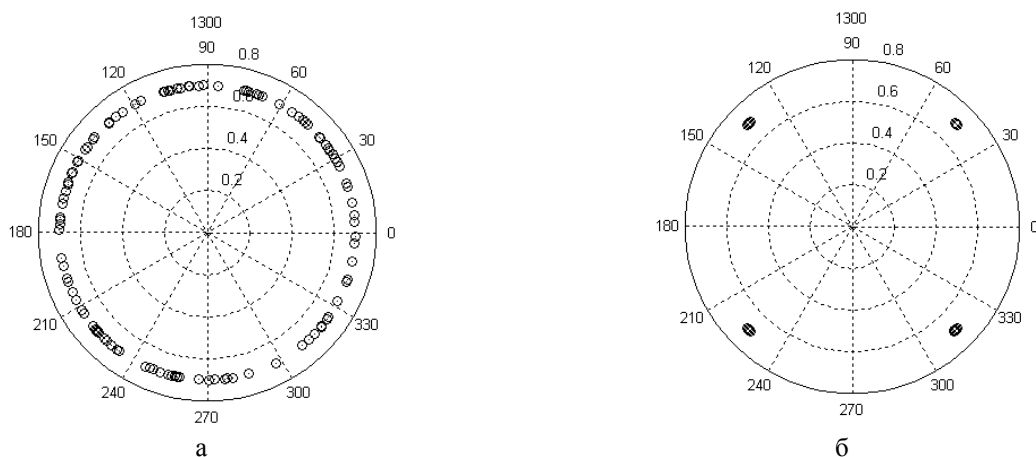


Рис. 3. Результат демодуляції для случая отсутствия привязки к эталонной сетке частот (а) и для случая привязанного массива к эталонной сетке частот (б)

Выводы

Рассмотренный в данной статье метод синхронизации дополняет полученные ранее методы предварительного анализа структуры OFDM сигналов. Основным результатом данной статьи заключается в получении достаточно точного метода синхронизации OFDM сигналов. В отличие от известных методов корреляционного анализа многочастотных сигналов префиксной структуры предлагаемый подход позволил добиться уменьшения объема вычислений и повышения точности демодуляции за счет точной привязки интервалов ортогональности. Апробация метода показала, что предложенная процедура позволяет обрабатывать сигналы при предельно низкой частоте дискретизации и малом разрешении квантователей. Все этапы цифровой обработки разработаны для условий осуществления автоматической программно-аппаратной реализации метода демодуляции OFDM сигналов.

Список литературы

1. Вишнеvский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишнеvский, 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.И. Лагутенко, Ю.А. Раснаев. – М.: ЭкоТрендз, 2005. – 384 с.

3. Fusco T. SynchronGnization techniques for OFDM-systems / T. Fusco // Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni (XVIII ciclo) 2004-2005.

4. Sandell M., Van de Beek J.J., Borjesson P.O. ML Estimation of timing and frequency offset in multicarrier systems. Research Report TULEA 1996:09. Division of Signal Processing, Lulea University of Technology, 1996.

5. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации: учеб. пособие / Б.И. Шахтарин, А.А. Иванов, П.И. Кобылкина и др. – М.: Гелиос АРВ, 2007. – 256 с.

6. Калашиников К.С. Синхронизация OFDM-сигналов во временной и частотной областях / К.С. Калашиников, Б.И. Шахтарин. – Вестник МГТУ. – 2011. – №1. – С. 18-27.

7. Кузниченко В.С. Цифровой корреляционный метод анализа OFDM сигналов в системах автоматического радиомониторинга / В.С. Кузниченко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: 2010. – Вип. 4(16). – С. 256-260.

8. Кузниченко В.С. Цифровая демодуляция OFDM сигналов в условиях частичной неопределенности параметров / В.С. Кузниченко, С.Г. Рассомахин // Системи управління навігації та зв'язку. – К., 2011. – Вип. 4(20). – С. 196-201.

Поступила в редакцію 11.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, доц. С.Г. Рассомахин, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков.

ПІДВЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЦИФРОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ І ДЕМОДУЛЯЦІЇ OFDM СИГНАЛІВ З ВІДОМИМИ ПАРАМЕТРАМИ

О.А. Білокуров

Дано коротке описання особливостей OFDM сигналів, які визначають перелік можливих ідентифікаційних ознак. Удосконалено кореляційний метод оцінки основних параметрів сигналів, заснований на циклічній префіксній структурі сигналу, за рахунок прив'язки начал інтервалів ортогональності до еталонної сітки частот. Моделюванням показана можливість завадостійкої демодуляції сигналів шляхом рішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР).

Ключові слова: OFDM сигнали, префікс, цифрова обробка.

IMPROVING THE ACCURACY DIGITAL ACQUISITION AND DEMODULATION OF OFDM SIGNALS WITH KNOWN PARAMETERS

A.A. Belokurov

A brief description of the features of OFDM signals, determine a list of possible signs of identity. Improved correlation method for estimating key parameters pas signals, based on the cyclic prefix signal structure by binding began intervals orthogonal to the reference frequency grid. The simulation showed possibility of interference-signal demodulation based on solving systems of linear algebra equations (SLAE).

Keywords: OFDM signals, prefix, digital processing.