

G. D. Dik  
*Baltic Forwarding Company*

A. B. Degtyarev  
*Saint-Petersburg state electro technical university «LETI»*

## APPLICATION IT-SERVICES INFORMATION SYSTEM BASED ON SOA TO IMPROVE TRANSPORTATION LOGISTICS EFFICIENCY

*The paper shows the ways for improved management of transportation logistics system in real time.*

**Transportation logistics system, IT-service, information systems, IT architecture, multi-criteria problem, efficiency, SOA**

---

УДК 621.39

В. Л. Литвинов  
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

А. В. Гуцин  
*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*

## Применение и реализация конвейерного преобразования Фурье с переменной длиной в параметризуемых OFDM-системах

*Обосновывается использование блока конвейерного преобразования Фурье в параметризуемых OFDM-системах. Приводится обзор быстрых алгоритмов для реализации такого блока. Предлагается схема реализации блока конвейерного преобразования Фурье с переменной длиной.*

### OFDM, дискретное преобразование Фурье, LTE, высокоскоростная передача данных

OFDM является частным случаем мультиплексной передачи данных в канале связи с частотным разделением (Frequency Division Multiplex – FDM). При формировании OFDM-символа поток последовательных информационных символов разбивается на блоки, содержащие  $M$  символов. Далее блок последовательных информационных символов преобразуется в блок параллельных символов, в котором каждый информационный символ соответствует определенной поднесущей частоте многочастотного сигнала. При этом длительность символа увеличивается в  $M$  раз. Таким образом, суммарная ширина спектра многочастотного сигнала соответствует ширине спектра исходного сигнала с последовательными символами. Целью такого преобразования является защита сигнала от узкополосных помех (либо от частичных искажений спектра в результате

переотражений и многолучевого распространения). Защита достигается благодаря тому, что параллельные символы многочастотного сигнала представляют собой кодовое слово помехоустойчивого кода (например, кода Рида–Соломона), который позволяет восстановить символы в случае их ошибочного приема из-за искажений спектра. Пример OFDM-сигнала изображен на рис. 1. Здесь  $b_1, b_2, \dots, b_m$  – медленные потоки данных, полученные разбиением быстрого потока на  $m$  частей;  $T_p$  – длительность одного символа;  $W'$  – ширина спектра одной поднесущей;  $W$  – полоса сигнала;  $F$  – разнос между поднесущими.

Главным отличием OFDM от FDM (как это следует из названия) является ортогональность каждой поднесущей. В случае FDM для того, чтобы символ после попадания в канал мог быть

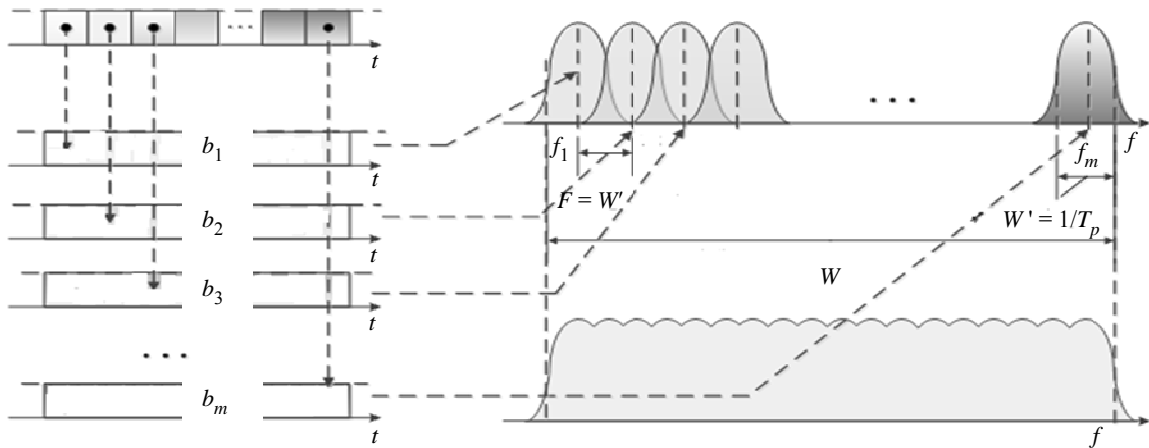


Рис. 1

демодулирован приемником, предусматриваются защитные частотные интервалы с каждой стороны каждого подканала. Данная особенность приводит к неэффективному использованию предоставленной полосы частот.

При OFDM-модуляции все поднесущие ортогональны друг другу и, следовательно, могут частично перекрываться между собой. Спектральная эффективность OFDM-системы многократно превышает спектральную эффективность FDM-систем при тех же параметрах и типе модуляции.

Пусть модуляционные символы (комплексные амплитуды)  $M_C$  поднесущих OFDM определены как  $b_i = A_i \exp(j\varphi_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, M_C$ , где  $A_i$  и  $\varphi_i$  – соответственно вещественные амплитуда и фаза, а символы передаются прямоугольными импульсами. Тогда результирующий сигнал в комплексном представлении будет иметь вид

$$\dot{S}(t) = \sum_{i=1}^{M_C} b_i \exp(j2\pi f_i t) = \sum_{i=1}^{M_C} b_i \exp\left(\frac{j2\pi(i-1)t}{T_p'}\right), \quad (1)$$

где  $f_1$  можно принять равной нулю и, следовательно,  $f_i = (i-1)F = (i-1)/T_p'$ .

Сигнал вида (1) представляет собой OFDM-символ.

Дискретизация (1) с интервалом  $T_S = T_p' / M_C$  дает последовательность:

$$\dot{S}_l = \dot{S}(lT_p' / M_C) = \sum_{i=1}^{M_C} b_i \left(\frac{j2\pi(i-1)l}{M_C}\right), \quad (2)$$

$$l = 0, 1, \dots, M_C - 1.$$

Формула (2) повторяет (за исключением несущественного постоянного коэффициента) обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ) после-

довательности модуляционных символов. Последнее объясняет основную причину популярности OFDM – реализация этого метода не требует модулирования параллельными генераторами  $M_C$  несущих и суммирования результатов [1].

На рис. 2 приведена упрощенная схема приемника и передатчика OFDM-сигналов.

Данная схема упрощенно описывает приемник и передатчик OFDM-сигналов линии «вниз» в стандарте 3GPP Long Term Evolution. Подробное описание ее работы изложено в [2]. Главной особенностью данной схемы является использование блоков дискретного преобразования Фурье ДПФ и ОДПФ. Также стоит отметить блоки сериализации и распараллеливания. Данные блоки можно исключить из схемы, если в качестве блоков ОДПФ и ДПФ использовать блоки с конвейерной реализацией ДПФ. Несмотря на ежегодный прирост вычислительных мощностей, реализация ДПФ продолжает быть весьма затратной в плане вычислительных ресурсов. Однако в 70–80-е гг. XX в. были разработаны алгоритмы, позволяющие значительно уменьшить затраты на реализацию ДПФ.

Наиболее популярным алгоритмом был и остается алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) по основанию 2. Данный алгоритм довольно широко применяется в цифровой обработке сигналов и в смежных областях. Он обладает наиболее простой реализацией. В его основе лежит операция «бабочка», представляющая собой комбинацию операций сложения двух отсчетов исходного сигнала и их умножение на коэффициенты. Главным недостатком данного алгоритма является то, что при его использовании можно получить ДПФ (или ОДПФ) только длины  $N = 2^m$ , где  $m$  – целое число.

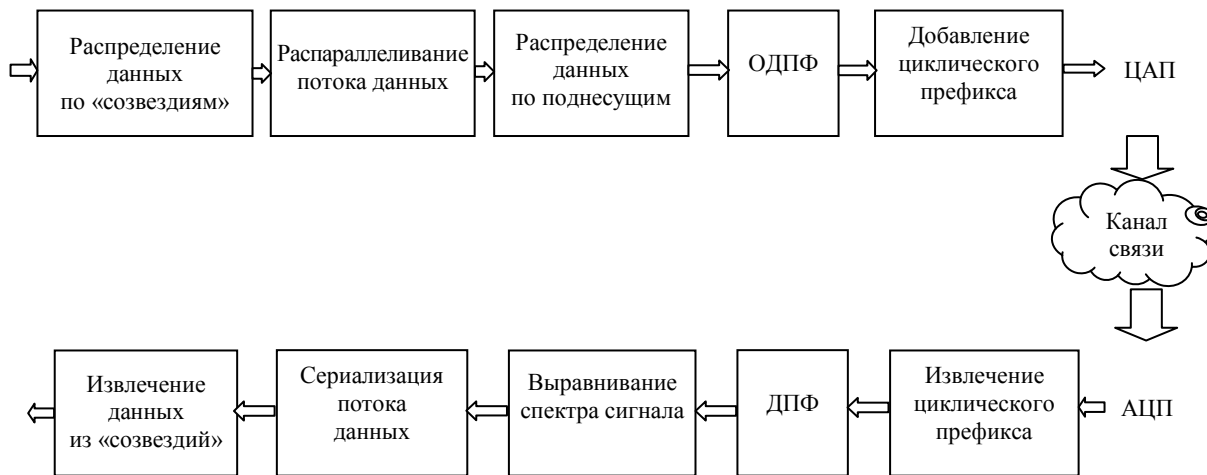


Рис. 2

Другой популярный способ реализации ДПФ – алгоритм с разделенными основаниями (Split-Radix algorithm – SRFA). Этот алгоритм основан на использовании помимо операции «бабочка» еще и операции «стрекоза» (dragonfly). Данные операции отличаются тем, что в операции «стрекоза» используется сразу 4 отсчета исходного сигнала. Этот алгоритм признан более эффективным, чем БПФ, однако количество точек ДПФ, которое можно получить при его использовании, также равняется  $N = 2^m$ , где  $m$  – целое число и больше двух.

Алгоритм Винограда преобразования Фурье основан на алгоритме с простыми множителями. Он позволяет получить количество точек ДПФ

$$N = \prod_{i=0}^{M-1} N_i, \quad (3)$$

где  $N_i$  – любое простое число ( $i = 0, 1, \dots, M - 1$ ). Этот алгоритм представляет наибольший интерес, поскольку является самым гибким из ранее перечисленных. Его применение в параметризуемых OFDM-системах наиболее оправданно, поскольку позволяет максимально эффективно использовать предоставленную полосу частот при разнесении сигналов по поднесущим. Например, в стандарте 3GPP Long Term Evolution при использовании полосы частот в 15 МГц количество точек ДПФ (и ОДПФ соответственно) равняется 1536. Такое значение может быть достигнуто только при использовании алгоритма Винограда преобразования Фурье\*.

Таким образом, можно сделать вывод, что алгоритм Винограда преобразования Фурье является наиболее предпочтительным при реализации параметризуемых OFDM-систем (таких, как LTE). Несмотря на то, что алгоритм Винограда преобразования Фурье является оптимальным с точки зрения умножений, реализация параметризуемых систем на его основе значительно затруднена. Дело в том, что данный алгоритм выводится посредством сопряжения алгоритма ДПФ с простыми множителями и гнездового алгоритма (см. [3]) и (в отличие от самого алгоритма ДПФ с простыми множителями) не позволяет разбить весь путь вычисления ДПФ на  $M$  независимых операций. В связи с этим для реализации ДПФ в параметризуемых системах было бы логично использовать алгоритм ДПФ с простыми множителями, который обладает той же гибкостью, что и алгоритм Винограда, хоть и уступает ему в оптимальности использования вычислительных ресурсов. Также конвейерная реализация может снизить сложность OFDM-модулятора за счет исключения блоков сериализации и распараллеливания потока данных.

Учитывая изложенное, необходимо более детально рассмотреть алгоритм БПФ с простыми множителями. Этот алгоритм очень похож на алгоритм Кули–Тьюки, однако число точек ( $N$ ) в одном окне ДПФ может равняться произведению взаимно простых множителей (согласно (3)). Примером такого числа может быть число точек в одном окне ДПФ, используемое для OFDM-модуляции в сетях LTE, где  $N = 1536$ , что при разложении на взаимно простые множители дает  $N = 2^9 \cdot 3$  ( $M = 10$ ). Как и в алгоритме Кули–Тьюки, в алгоритме БПФ с простыми множителями вычисление ДПФ разбивается на этапы. На каждом

\* Quantization and its Effects on OFDM Concepts for Wireless Indoor Applications. / Heiko Schmidt and Karl-Dirk Kammeyer. // [http://www.ant.uni-bremen.de/sixcms/media.php/102/4860/inowo\\_1999\\_schmidt.pdf](http://www.ant.uni-bremen.de/sixcms/media.php/102/4860/inowo_1999_schmidt.pdf).

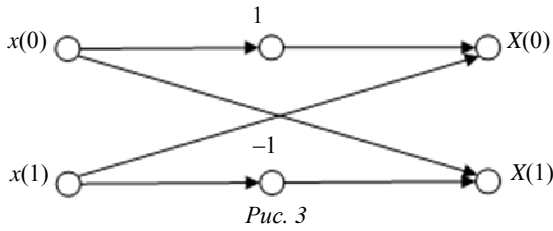


Рис. 3

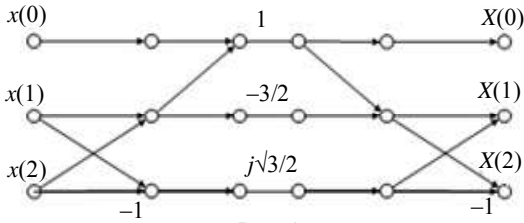


Рис. 4

этапе отсчеты входных данных умножаются на коэффициенты и складываются между собой по определенным правилам. Эти правила в алгоритме Кули–Тьюки определяются операцией «бабочка» по основанию 2 (рис. 3).

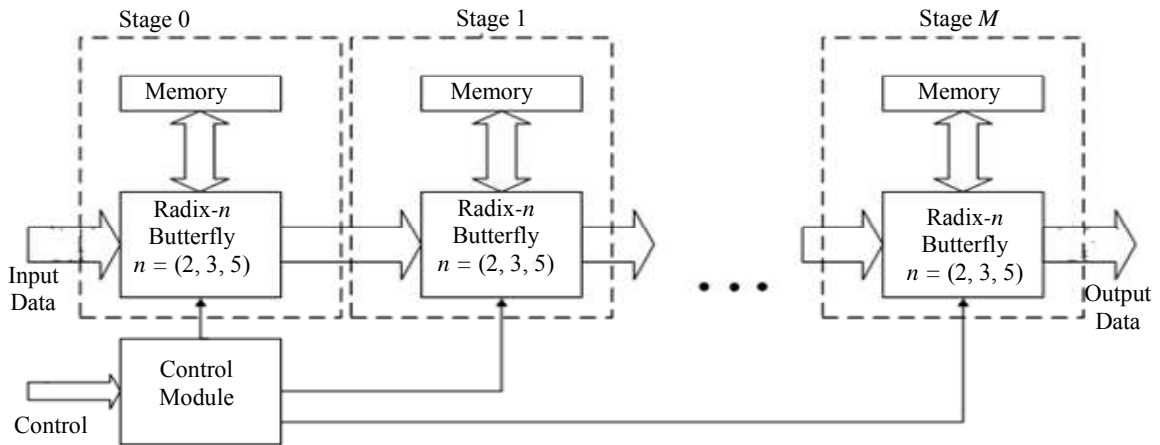


Рис. 5

В алгоритме БПФ с простыми множителями помимо операции, показанной на рис. 3, существуют и другие «бабочки» для каждого простого множителя. Так, пример «бабочки» по основанию 3 изображен на рис. 4.

Таким образом, можно спроектировать устройство (либо IP-ядро), позволяющее получить конвейерное ДПФ для практически любого

количества точек. Конвейер данного устройства будет иметь  $M$  ступеней (по числу взаимно простых множителей и степеней, составляющих количество точек в окне ДПФ). Каждая ступень конвейера будет состоять из параметризуемого блока, реализующего операцию «бабочка», и блока памяти. Память необходима для запоминания отсчетов при последовательном поступлении входных данных, а также для хранения значений коэффициентов, необходимых при умножении в операции Radix- $n$  Butterfly. Благодаря параметризуемости блоков Radix- $n$  Butterfly возможно получить разное количество точек при одной и той же реализации. Так при реализации 1536-точечного ДПФ можно получить 1024 точек ( $2^{10}$ ) в окне или 2560 точек ( $2^9 \cdot 5$ ). Схема такого устройства приведена на рис. 5 (см. [4]). Естественно, количество точек может быть уменьшено за счет

исключения любой из ступеней конвейера.

Очевидно, что главной сложностью при проектировании такого устройства будет создание блока Radix- $n$  Butterfly. При этом конвейерная параметризуемая реализация требует значительных ресурсов памяти и умножений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ипатов В. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2005.
2. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Юрчук А. Б. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура. М.: Экотрендз, 2010.
3. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. М.: Радиосвязь, 1986.
4. Гуцин А. В., Литвинов В. Л. Современные методы и средства реализации алгоритмов быстрого преобразования Фурье в информационных системах // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: II Междунар. науч.-техн. и науч.-методическая конф. / СПбГУТ. СПб., 2013. С. 564–567.

V. L. Litvinov

*Saint-Petersburg state electro technical university «LETI»*

A. V. Gushchin

*Institution of Higher Vocational Education The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

## APPLICATION AND IMPLEMENTATION PIPELINED FOURIER TRANSFORMS IN PARAMETERIZED – LENGTH OFDM SYSTEMS

*We demonstrate the use of pipelined Fourier transforms block in parameterized - length OFDM systems. We review fast algorithms for the implementation of such block. And offer the block scheme of the pipelined Fourier transforms with variable length.*

**OFDM, Discrete Fourier Transform, LTE, high speed data transfer**

---