

УДК 621.3.049.77–048.24:537.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА БПФ-ОБПФ

Синицкий Р.С., студент группы 760802

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Печень Т.М. – ст. преподаватель кафедры ИКТ

Аннотация. Произведено математическое моделирование оценки спектральных характеристик телекоммуникационных сигналов на основе быстрого преобразования Фурье. Установлено, что этот быстрый и мощный инструмент, однако для него необходимо использовать сигналы определенной длины. Обоснованы основные схематические решения.

Ключевые слова: приемопередающий тракт, система связи, алгоритм БПФ-ОБПФ, спектральный анализ, модулятор, демодулятор.

Введение. В настоящее время очень актуальна задача быстрой обработки больших массивов данных, что влечет за собой значительное увеличение производительности обрабатывающих устройств. Интерес к цифровым методам спектрального анализа поддерживается тем улучшением характеристик, которое они обещают, а именно: высоким частотным разрешением, повышенной способностью к обнаружению слабых сигналов или же сохранением «достоверности» формы спектра при меньшем числе используемых параметров. Методы спектрального анализа, а именно с применением алгоритмов, основанных на быстром преобразовании Фурье, являются быстро действенными, несут высокую точность, а также имеют высокое разрешение спектральных оценок.

Основная часть. В основе моделирования приемопередающей части системы связи лежат алгоритмы «переноса спектра вверх» и «переноса спектра вниз». Алгоритм БПФ-ОБПФ позволяет выполнять операции в частотной области с переходом во временную, что сокращает вычислительные объемы, т.е. повышает эффективность обработки. На рисунке 1 представлена структурная схема приемопередающего тракта системы связи на основе алгоритма БПФ-ОБПФ.

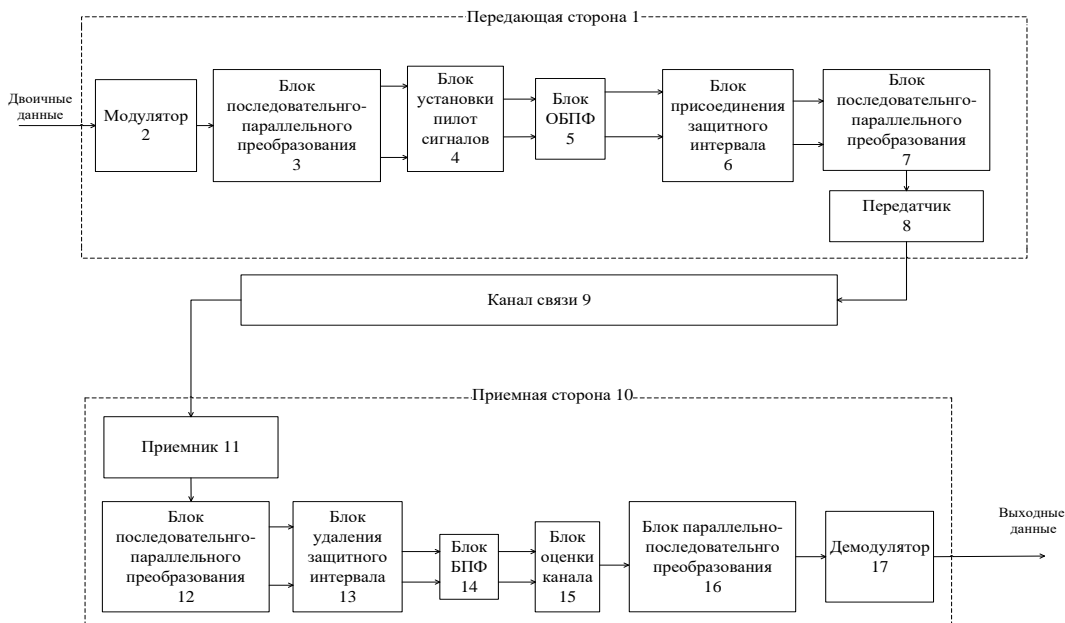


Рисунок 1 – Структурная схема приемопередающего тракта системы связи на основе алгоритма БПФ-ОБПФ

Устройство работает следующим образом. На передающую станцию 1 поступает последовательность двоичных символов. В модуляторе 2 последовательность двоичных

символов разбивают на слова, состоящие из d символов ($d=1, 2, \dots, D$). Каждому слову присваивают модулированный символ данных в виде комплексного числа.

В блоке последовательно-параллельного преобразования 3 преобразуют последовательность модулированных символов данных в параллельные группы модулированных символов.

В блоке установки пилот-сигналов 4 в параллельных группах модулированных символов между модулированными символами данных располагают пилот-символы, формируя таким образом последовательность групп, каждая из которых состоит из N модулированных символов, $N=Q+K$, где Q – число модулированных символов данных в параллельной группе, K – число пилот-символов в параллельной группе.

В блоке ОБПФ 5 с каждой группой выполняют ОБПФ, формируя параллельные выходные группы значений ОБПФ.

В блоке присоединения защитного интервала 6 дополняют параллельные выходные группы значений ОБПФ защитным интервалом.

В блоке параллельно-последовательного преобразования 7 преобразуют параллельные выходные группы значений ОБПФ с защитным интервалом в последовательную форму, формируя таким образом последовательность ортогональных частотных мультиплексированных символов.

Передают последовательность ортогональных частотномльтиплексированных символов с выхода передатчика 8 по каналу связи 9 на принимающую станцию 10.

На принимающей станции 10 через канал связи 9 в приемнике 11 принимают их и в блоке последовательно-параллельного преобразования 12 преобразуют принятые частотно-мультиплексированные символы в параллельные группы входных значений.

В блоке удаления защитного интервала 13 удаляют защитный интервал.

С каждой группой входных значений в блоке БПФ 14 выполняют БПФ, формируя таким образом N модулированных символов в каждом блоке.

В блоке оценки канала 15 в каждой группе по пилот-символам выполняют оценку канала связи. Используя полученные результаты оценки канала связи, выполняют оценку модулированных символов данных, формируя группы оценок модулированных символов данных.

В блоке параллельно-последовательно преобразования 16 преобразуют группы оценок модулированных символов данных в последовательную форму, формируя таким образом последовательность оценок модулированных символов данных.

В демодуляторе 17 выполняют демодуляцию полученных оценок модулированных символов данных, формируя таким образом последовательность двоичных данных, которые с выхода демодулятора 17 поступают на выход принимающего устройства 10.

Найдём импульсную характеристику k -го фильтра, обеспечивающего измерения спектра в точке $z_k = e^{j(\frac{2\pi}{N})k}$ [1]. Она равна:

$$h(n) = e^{-j(\frac{2\pi}{N})kn}, 0 \leq n \leq N - 1 \quad (1)$$

Для моделирования необходимо использовать аппарат Z-преобразования, которое имеет вид:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j(\frac{2\pi}{N})kn} z^{-n} = \frac{1-z^{-N}}{1-z^{-1}e^{-j(\frac{2\pi}{N})k}} \quad (2)$$

С учетом того, что Z-преобразование и Фурье преобразование взаимосвязаны, перепишем выражение 2 следующим образом:

$$H(e^{j\omega}) = e^{-j\omega\frac{N-1}{2}} e^{j\frac{\pi k}{N}} \frac{\sin(\frac{N\omega}{2})}{\sin(\frac{\omega}{2} + \frac{\pi k}{N})} = e^{-j\omega\frac{N-1}{2}} e^{j\frac{\pi k}{N}} f_N(\omega, k) \quad (3)$$

Спектр сигнала на выходе блока 14 представлен на рисунке 2.

Метод выполнения анализа при числе отсчетов сигнала $L = 2N$ становится очевидным, если обратиться к направленному графу БПФ. Видно, что выходные отсчеты с четными номерами располагаются в верхней половине графа. Это означает, что в алгоритме БПФ, предназначенном для получения только четных отсчетов спектра, достаточно лишь частично

обработать все L отсчетов, чтобы получить верхнюю половину выходных отсчетов первого этапа БПФ. Только эта половина отсчетов дает все четные коэффициенты ДПФ.

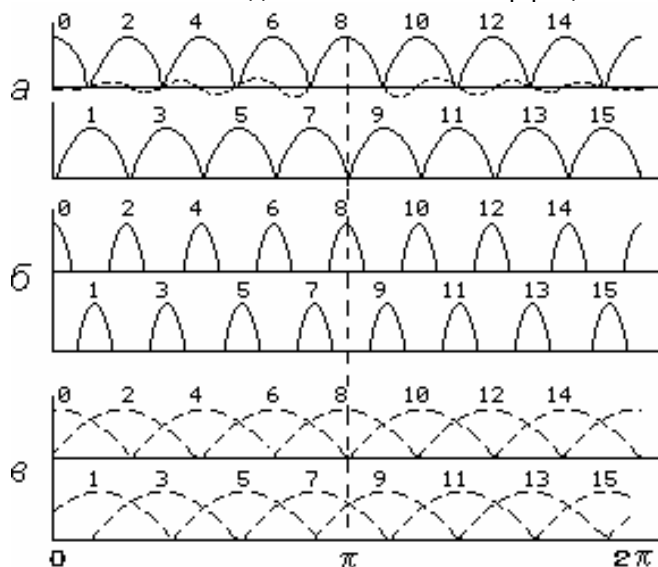


Рисунок 2 – Спектр сигнала на выходе блока 14

Этот подход можно развивать дальше, отметив, например, что восемь верхних выходных коэффициентов дают каждый четвертый коэффициент ДПФ, причем их можно определить, выполнив половину операций на первом этапе, половину – на втором, а также четырехточечное БПФ, полученных на втором этапе восьми отсчетов. Пусть в общем случае число отсчетов сигнала L равно MN , где N – требуемое число спектральных отсчетов, а M – целое число, большее единицы. Искомое преобразование равно:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} [\sum_{m=0}^{M-1} x(n + mN)] e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (4)$$

На рисунке 1 в блоке ОБПФ выполняется процедура по следующему алгоритму:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W^{kn} \quad (5)$$

Это отображение $x(n) \rightarrow X(k)$ будем считать, как прямое ДПФ. Обратное преобразование $X(k) \rightarrow x(n)$ в случае ОДПФ:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W^{-kn}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (6)$$

Выражение 6 отличается по форме только знаком степени W . Однако различие можно устранить если перейти к комплексно-сопряженной форме:

$$x^*(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X^*(k) W^{-kn}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (7)$$

В обратном преобразовании (при восстановлении сигнала) для входа и выхода необходимо использовать подстановку:

$$\begin{aligned} x(n) &= \hat{U}^*(n) = \hat{U}(N - n), \\ X^*(k) &= \hat{S}(k), k, n = 0, 1, \dots, N - 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Наибольший выигрыш получается для длины временной последовательности $N = 2^k$, так как в этом случае процесс разбиения на две последовательности удастся довести до 2-х точечного преобразования Фурье [2, 16]. При этом на каждом этапе объединения двух БПФ меньшего порядка требуется $N/2$ операций умножения. Общее количество операций комплексного умножения для вычисления БПФ потребуется:

$$N_{оп} = \frac{N}{2} * \log_2 N \quad (9)$$

Теперь обратим внимание, что последовательность отсчетов сигнала на входе алгоритма быстрого преобразования Фурье не соответствует естественному течению времени. Ее следует переупорядочить. Для того, чтобы определить как следует переставить отсчеты воспользуемся двоичным представлением номера входного отсчета. При перестановке младшие и старшие биты номера отсчета меняются местами. В качестве примера рассмотрим перестановку входных отсчетов 8-ми точечного БПФ. Соответствие входных номеров отсчетов сигнала и номеров на входе алгоритма БПФ приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Соответствие входных номеров отсчетов сигнала и номеров на входе алгоритма БПФ

Номер	Двоичное представление	Двоично-инверсная перестановка	Десятичное представление
0	000	000	0
1	001	100	4
2	010	010	2
3	011	110	6
4	100	001	1
5	101	101	5
6	110	011	3
7	111	111	7

Следует отметить, что в настоящее время быстрое преобразование Фурье обычно выполняется в сигнальных процессорах, а в них предусмотрен особый вид адресации — двоично-инверсный адрес. При этом старшие и младшие биты адреса меняются местами аппаратно, а реальная перестановка не производится. Это позволяет значительно сокращать время вычисления спектра входного сигнала. Не меньший выигрыш в быстродействии получается за счет применения умножителей-накопителей.

Заключение. Алгоритм БПФ-ОБПФ позволяет выполнять моделирование приемопередающей системы связи с высоким быстродействием и малыми затратами на вычисления, т.к. минимальный выигрыш эффективности обработки сигналов в цифровой системе составляет (после равно логарифм). Однако стоит отметить, что массив данных используется определенный и кратный степени двойки.

Список использованных источников:

1. Методы формирования и цифровой обработки сигналов: Учеб. пособие / Авсянников В.А. БГУИР Минск, 2010, 18 с.
2. Цифровой спектральный анализ: Учеб. пособие / А.Н. Кренёв, Т.К. Артёмова. Яросл. гос. ун-т. Ярославль, 2002. 114 с.

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

MODELING OF THE transceiver TRACT OF THE COMMUNICATION SYSTEM BASED ON THE FFT- IFFT ALGORITHM

Sinitski R.S., student group 760802

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus*

Pechen T.M. – senior lecturer of the Department of ICT

Annotation. Mathematical modeling of the estimation of the spectral characteristics of telecommunications signals based on the fast Fourier transform is performed. It is established that this is a fast and powerful tool, but it needs to use signals of a certain length. Design and technology documentation were developed.

Keywords. transceiver tract, communication system, FFT-IFFT algorithm, spectral analysis, modulator, demodulator