

Д. С. КАЛЬЧЕНКО

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ

В настоящее время растущие ресурсы вычислительной техники дают возможность исследовать временные и спектральные характеристики сигналов в реальном масштабе времени и выполнять анализ процесса фильтрации с использованием математических моделей цифровых фильтров.

В данной статье рассматриваются принципы работы и анализируются основные характеристики программно-аппаратной системы DKF, функционирующей на базе персонального компьютера класса Pentium с операционной системой семейства Windows. Система DKF была спроектирована, реализована и успешно прошла испытания.

Система обладает следующими функциональными возможностями:

- сбор данных о входящем сигнале звуковых частот через плату ввода/вывода типа ISA или PCI;
- первичная обработка поступивших входных данных, вычисление спектральных характеристик с помощью дискретного преобразования Фурье и их отображение на экране монитора в реальном масштабе времени;
- формирование заданной передаточной характеристики цифрового фильтра и последующая оптимизация его параметров (порядок фильтра и коэффициенты усиления его умножителей);
- анализ сигнала, прошедшего через цифровой фильтр по априорно известным характеристикам сигнала и цифрового фильтра.

Структурная схема системы приведена на рис. 1.

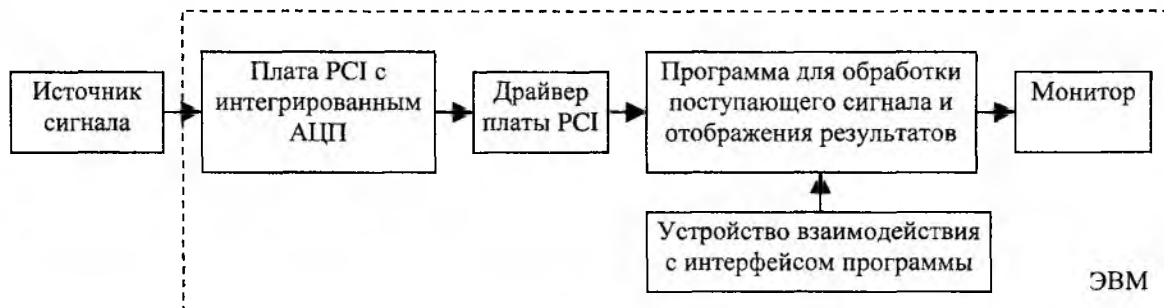
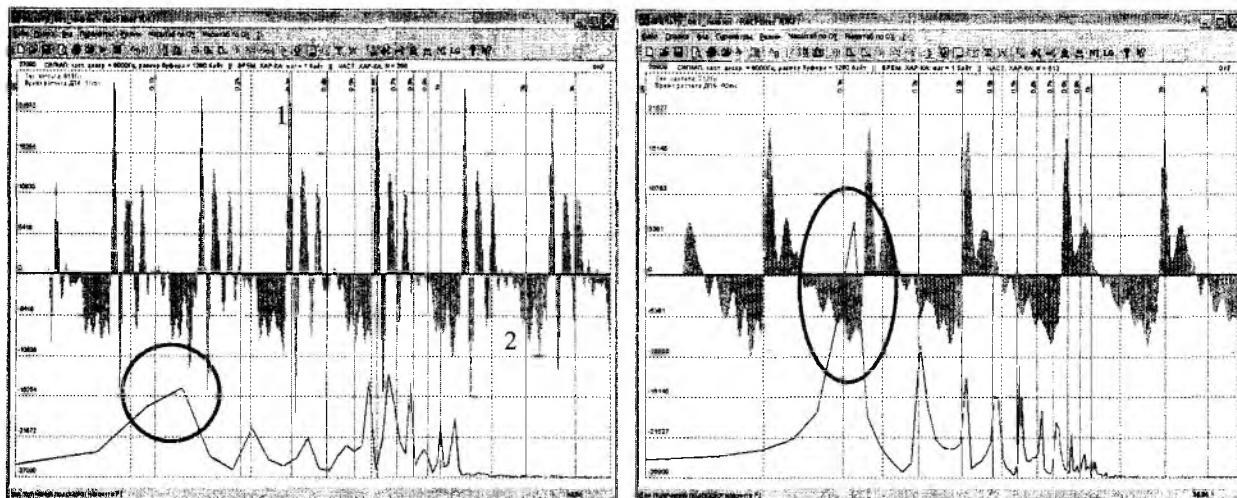


Рис. 1

С помощью импульсно-кодовой модуляции поступающий от источника аналоговый сигнал преобразуется в цифровые отсчеты с выбранной разрядностью: 4, 8, 16 бит. Отсчеты с выхода АЦП помещаются в область памяти для их хранения и последующей обработки. Частота дискретизации может принимать различные значения из ряда: 8, 11, 12, 16, 22, 24, 32, 44 и 48кГц. Объем памяти, отводимой для хранения значений цифровых отсчетов, согласовывается с размером прямоугольного окна, используемого при вычислении свертки с исходным цифровым сигналом. Благодаря этому при вычислениях требуются минимальные системные ресурсы ЭВМ. На рис. 2 изображены временная (кривая 1) и спектральная $X[k]$ (кривая 2) характеристики сигнала (звук «А») при частоте дискретизации 8кГц и прямоугольным окном размером 256 и 512 отсчетов. Из рис.2 видно, что спектральные пики последовательности $X[k]$ расширяются при меньшей длине окна за счет их свертки со спектром прямоугольного окна. Кроме того в спектре исследуемого сигнала появляются дополнительные составляющие, т.е. происходит утечка энергии спектральных пиков в

боковые лепестки. Боковые лепестки искажают амплитуду соседних спектральных пиков, что приводит к смещению оценки и к маскировке слабых спектральных составляющих (рис. 2а). С целью устранения указанного явления в системе предусмотрена возможность применения окна специальной (не прямоугольной) формы. При этом влияние боковых лепестков можно уменьшить до 30дБ.



а)

б)

Рис. 2

Быстродействие описываемой системы позволяет анализировать сигналы с окном от 128 до 4092 отсчетов (периодов дискретизации), которое выбирается исходя из требуемой точности аппроксимации.

Вычисление ДПФ производится по формуле (1):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j2\pi kn/N), \quad (1)$$

где $x[n]$ – N-точечная последовательность данных;
 $X[k]$ – N-точечная последовательность спектральных коэффициентов;
 N – количество спектральных отсчетов.

Время вычисления ДПФ для различных N на ЭВМ с тактовой частотой 1000МГц составит: $t_b = 5$ мс при $N = 128$; $t_b = 10$ мс при $N = 256$; $t_b = 35$ мс (25 кадров/сек) при $N = 512$; $t_b = 150$ мс при $N = 1024$; $t_b = 240$ мс при $N = 2048$ и $t_b = 800$ мс при $N = 4096$.

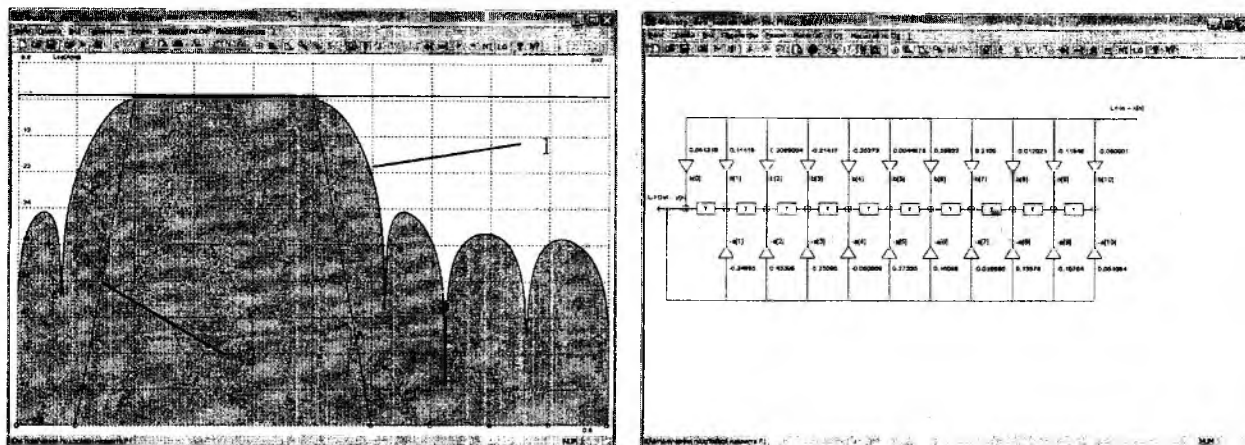
Полученные на выходе АЦП временные отсчеты поступают на вход цифрового фильтра (ЦФ) в виде математической модели, функционирующей в соответствии с разностным уравнением (2):

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} b[k]x[n-k] - \sum_{k=1}^{N-1} a[k]y[n-k], \quad (2)$$

где $a[k]$, $b[k]$ – постоянные коэффициенты;
 $x[n]$ – входная последовательность отсчетов;
 $y[n]$ – выходная последовательность отсчетов.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цифрового фильтра (рис. 3а кривая 1) предварительно оптимизируется методом аппроксимации с неравномерным шагом к задан-

ной форме АЧХ (рис. 3а кривая 2) по критерию минимума среднеквадратического отклонения (3). Из литературы известно, что данный метод позволяет синтезировать цифровой фильтр заданного порядка N , для которого ошибка аппроксимации в полосах пропускания и подавления будет минимальна по сравнению с другими известными методами. На рис. 3б приведена каноническая форма реализации синтезированного цифрового фильтра.



а)

б)

Рис. 3

Частотная характеристика синтезируемого фильтра представляется в виде функции двух аргументов $H(w, \underline{c})$, где w – нормированная частота; \underline{c} – вектор параметров фильтра, связанных с его коэффициентами. Задача синтеза состоит в выборе вектора \underline{c} , минимизирующего выражение (3):

$$\max \{F(w) | H_3(w) - H(w, \underline{c})\} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $F(w)$ – весовая функция, используемая для выделения отдельных диапазонов частот в ходе процесса оптимизации;
 $H_3[w]$ – заданная АЧХ цифрового фильтра;
 $H(w, \underline{c})$ – оптимизируемая АЧХ цифрового фильтра, зависящая от коэффициентов $a[k]$ и $b[k]$ цифрового фильтра.

Для задания весовой функции $F(w)$ весь интервал частот разбит на поддиапазоны, количество которых зависит от порядка цифрового фильтра с целью увеличения равномерности частотной характеристики фильтра в области пропускания.

Изменяя порядок цифрового фильтра, система позволяет исследовать такие характеристики, как минимальное затухание в полосе задерживания и прямоугольность частотной характеристики для фильтров различных порядков (до 10-го включительно). На рис.3 приведен результат оптимизации цифрового фильтра 10-го порядка, у которого минимальное затухание составляет более 30дБ, а коэффициент прямоугольности на уровне 34дБ равен 0,53. Из рисунка также следует, что метод обеспечивает равноволновые пульсации.

С целью увеличения скорости процесса оптимизации применен убывающий экспоненциальный закон изменения шага оптимизации. Это позволяет максимально быстро достичь минимума весовой функции $F(w)$ (3) и не потерять заданную точность оптимизации. При этом скорость оптимизации АЧХ полосового ЦФ и минимальное подавление в полосе задерживания для различных порядков фильтра составили соответственно: 2 пор. – менее 1с и 6дБ, 4 пор. – 2с и 12дБ, 6 пор. – 10с и 18дБ, 8 пор. – 24с и 24дБ, 10 пор. – 54с и 30дБ.

Устойчивость системы цифровой фильтрации анализируется на наличие отрицательных действительных частей у всех полюсов передаточной функции. Выход действительных частей полюсов в отрицательные значения исключен в алгоритме оптимизации, что позволяет синтезировать устойчивые цифровые фильтры даже при наличии у них обратной связи выхода с входом (рекурсивные ЦФ). На рис. 4 приведена импульсная характеристика рекурсивного ЦФ 10-го порядка (первые 33 отсчета). Исследование графиков импульсной характеристики цифровых фильтров (рис. 4) подтверждает их устойчивость при наличии обратной связи.

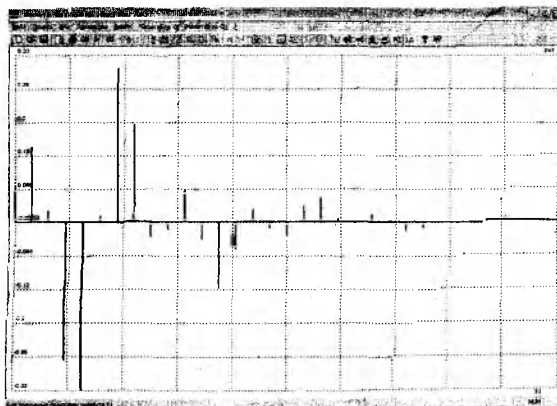


Рис. 4

Представленная система иллюстрирует возможности современных компьютерных технологий в области обработки сигнала (в том числе речевого) и их доступность широкому кругу пользователей.

Список литературы: 1. Бондарев В.Н., Трёстер Г., Чернега В.С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1999. 398 с.: ил. 2. Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. Цифровая обработка речевых сигналов. М.: Радио и связь, 1981. 459 с. 3. Горелов Г.В., Ромашкова О.Н., Чан Туан Ань. Качество управления речевым трафиком в телекоммуникационных сетях. М.: Радио и связь, 2001. 112 с.: ил.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 05.07.2002