

1545524

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи
УДК 681.32

Ефимов Владимир Владимирович

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ МЕТОДОВ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ФУРЬЕ С "ДЕФОРМИРУЕМОЙ" ОСЬЮ ЧАСТОТ

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

05.13.11 - Математическое и программное обеспечение
комплексов, систем и сетей

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Профессор В.Д.Курганов

Ермолов

Москва - 1994

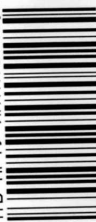
Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Курганов В.Д.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Бархоткин В. А.
кандидат технических наук,
доцент Михайлов С. Ф.

Ведущая организация - НИИ "Аргон".

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1545521

Ефимов В.В. Анализ и синте

Защита состоится "20" июня 1994 г. в 14³⁰ часов на заседании специализированного совета К.053.15.04 "Вычислительная и информационная техника" в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу.

Автореферат разослан "22" апреля 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного
совета к.т.н., доцент

Иванов С.Р.

Подписано в печать 6.04.94г. Объем 1.0п.л. Заг.184. Тир.100.

Типография МГТУ им.Н.Э.Баумана

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Одним из основных направлений применения средств вычислительной техники (СВТ) является спектральный анализ цифровых сигналов на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). Необходимость повышения технико-экономических характеристик бортовых вычислительных систем, использующих БПФ в режиме реального времени, ставит проблему разработки новых методов БПФ и СВТ для их реализации.

ЦЕЛЬ диссертационной работы является разработка новых методов реализации преобразования Фурье с "деформируемой" осью частот для повышения быстродействия БПФ-процессоров.

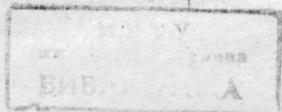
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Для решения поставленной задачи в диссертации использованы методы спектрального анализа, аппаратной реализации арифметических операций, комбинаторики, теории факторизации разреженных матриц преобразований, теории параллельной обработки информации.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. К основным научным результатам, полученным в диссертационной работе, относятся:

1. Методика синтеза БПФ с "деформируемой" осью частот.
2. Разработка на ее основе четырех методов БПФ:
 - модифицированное дискретное преобразование Фурье (МДПФ);
 - модифицированное быстрое преобразование Фурье (МБПФ);
 - модифицированное БПФ без фазового сдвига исходных данных (МБПФБС);
 - "деформируемое" БПФ (ДБПФ).
3. Проведение анализа быстродействия и точности реализации МДПФ, МБПФ, МБПФБС и ДБПФ.
4. Анализ технико-экономических характеристик архитектур процессоров для реализации БПФ с "деформируемой" осью частот.
5. Разработка и анализ архитектуры поразрядного умножителя для БПФ-процессоров.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ. Разработанные в диссертации четыре метода БПФ с "деформируемой" осью частот, полученные выражения для оценки быстродействия и точности их реализации могут быть использованы при построении специпроцессоров БПФ для всевозможных технических приложений.

Разработанные в диссертации три варианта архитектур процессо-



1545521

ров БПФ с "деформируемой" осью частот на различной элементной базе могут быть использованы для решения задач спектрального анализа цифровых сигналов во многих вычислительных системах и, в частности, в бортовых устройствах цифровой обработки информации, работающих в реальном масштабе времени.

Предложенные в работе поразрядные умножители могут использоваться как в БПФ-процессорах, так и в других цифровых вычислительных устройствах, где после умножения всегда следуют операции типа "суммирование".

Разработанные в диссертации программы МДПФ и МБПФ могут быть использованы для эффективного решения многих задач спектрального анализа цифровых сигналов на универсальных ЭВМ.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Результаты диссертационной работы внедрены на Калужском приборостроительном заводе "Тайфун".

Применение разработанных в диссертации специализированного цифрового вычислительного устройства обработки информации (СЦВУОИ) и программы, реализующей МБПФ, позволило в системе управления устройством отображения визуальной информации сократить аппаратные затраты на 40 %, потребляемую мощность на 30 % и повысить быстродействие в 2 раза. Годовой экономический эффект от внедрения составил в 1991 году 90 тысяч рублей. Программа, реализующая МБПФ, использовалась при испытании на помехоустойчивость работы обратного канала кабельного телевидения (ОККТ) на Калужском приборостроительном заводе "Тайфун" в 1993 году для анализа частотного спектра сигналов, передаваемых и принимаемых устройствами ОККТ.

Методы МДПФ и МБПФ были использованы при разработке экспериментального образца цифрового блока выделения сигналов в Конструкторском Бюро Машиностроения (г. Коломна). Применение МДПФ позволило вычислять преобразование Фурье на произвольных частотах в восемь раз выше, чем при непосредственной реализации ДПФ. Применение МБПФ позволило в среднем в два раза повысить быстродействие реализации БПФ.

Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на трех конференциях: Всесоюзная конференция "Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического и машинного моделирования" (Тамбов, 1989); Всесоюзная конференция НТТМ и студентов "Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники" (Москва, 1989);

Всесоюзная научно-техническая конференция с международным участием стран членов СЭВ "Применение статистических методов в производстве и управлении" (Пермь, 1990).

Результаты диссертационной работы использовались в трех совместных НИР 31-го отдела НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э.Баумана с НИИ "Стрела" (г. Тула) и КЕМ (г. Коломна):

1. Архитектура поразрядного умножителя для БПФ-процессоров использовалась в НИР "Разработка процессора БПФ с использованием СЕИС на базе К-МОП БМК" (тема ИО64588, НИИ "Стрела").

2. Методы БПФ с "деформируемой" осью частот использовались в двух НИР:

а) "Разработка экспериментального образца цифровой вычислительной системы для обработки сигналов" (тема ИЗ14989, НИИ "Стрела");

б) "Разработка экспериментального образца цифрового блока выделения сигналов" (тема ИЗ14089, КЕМ).

ПУБЛИКАЦИИ. Материалы диссертационной работы отражены в семи печатных работах, шесть из которых опубликованы лично автором и одна в соавторстве.

По материалам диссертации оформлено изобретение.

СТРУКТУРА РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 62 наименований и трех приложений. Основное содержание изложено на 121 странице машинописного текста, содержит 34 рисунка и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** обоснована актуальность темы диссертации и определен круг исследуемых вопросов.

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** проведен обзор основных известных методов реализации преобразования Фурье.

Непосредственная реализация дискретного преобразования Фурье (ДПФ) для комплексной последовательности чисел $Z(n)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$) осуществляется согласно выражению

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} Z(n) W_N^{nk},$$

$$\text{где } W_N^{nk} = e^{-j \frac{2\pi}{N} nk};$$

$$j = \sqrt{-1};$$

k - номер определяемого коэффициента Фурье ($k = \overline{0, N-1}$);
 N - размер массива исходных данных.

Быстрые преобразования Фурье - это различные методы уменьшения времени реализации ДПФ.

Одна из самых ранних идей возможности создания БПФ-алгоритмов относится к 1947 году - это алгоритм Левинсона.

Но только со времени публикации в 1966 году метода Кули и Тьюки и обоснование Стогхемом возможности его применения для вычисления свертки, БПФ-алгоритмы начали широко применяться для цифровой обработки сигналов. Затем появился целый ряд алгоритмов БПФ, основанных на методе Кули и Тьюки: БПФ-алгоритмы с основанием 3, 4, 6, 8, 12, методы Рейдера, Бруна, Рейдера-Бреннера, БПФ с двойным радикалом и многие другие.

В 1976 году Виноград предложил новый алгоритм преобразования Фурье, который основан на алгебраической теории сложности и требует значительно меньшего числа арифметических операций, чем метод Кули и Тьюки. В последующие годы был разработан целый ряд методов БПФ, использующих алгоритм Винограда в качестве основы.

Наиболее просто как программно, так и аппаратно реализовать БПФ с замещением при разложении по основанию 2, основанное на методе Кули и Тьюки.

Минимальное число арифметических операций требуется при реализации БПФ с двойным радикалом.

БПФ, основанные на методе Кули и Тьюки, обеспечивают высокое быстродействие как правило лишь при $N=2^S$, где S - натуральное число.

При реализации преобразования Фурье со смешанным основанием минимальное число арифметических операций и, следовательно, максимальное быстродействие достигается при использовании алгоритма Винограда и его модификаций. недостаток алгоритма Винограда и его модификаций - высокая сложность аппаратной и программной реализации по сравнению с БПФ-алгоритмами, основанными на методе Кули и Тьюки.

Главным недостатком всех названных выше методов является то, что они позволяют эффективно определять сразу все коэффициенты ДПФ, в то время как в ряде задач цифровой обработки информации, где заранее известна некоторая априорная информация о частотном спектре выделяемого сигнала, нет необходимости вычислять все коэффициенты преобразования Фурье, а достаточно их определить

в заданном диапазоне частот.

Проблема разработки методов реализации БПФ с "деформируемой" осью частот, позволяющих эффективно вычислять коэффициенты ДПФ в заданном диапазоне частот, в настоящее время почти не изучена.

Для повышения эффективности выполнения многих задач цифровой обработки информации, в которых заранее известна априорная информация о частотном спектре выделяемого сигнала, является актуальной проблема разработки новых методов БПФ с "деформируемой" осью частот, а также устройств для их реализации.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ разработаны и проанализированы методика синтеза БПФ с "деформируемой" осью частот и четыре метода на ее основе: модифицированное дискретное преобразование Фурье, модифицированное БПФ, модифицированное БПФ без фазового сдвига данных и "деформируемое" БПФ.

МДПФ позволяет вычислять один либо несколько коэффициентов преобразования Фурье независимо друг от друга. При этом МДПФ обеспечивает быстродействие, в среднем, в восемь раз выше, чем при непосредственной реализации ДПФ.

Остальные три метода позволяют вычислять с высоким быстродействием коэффициенты ДПФ $F_{R1h} = [F(1), F(1+h), F(1+2h), \dots, F(1+(R-1)h)]$, где 1 - номер первого определяемого коэффициента ДПФ, h - шаг следования коэффициентов ($h=2^S$), а R - их число ($R=2^S$).

Методика синтеза БПФ разработана путем факторизации разреженных матриц преобразования Фурье и в матричном виде представлена выражением $F_{R1h} = Z M_1 (I_{\sigma T, h} \otimes W_{N-h}^0)$,

где $Z = [Z(0), Z(1), Z(2), \dots, Z(N-1)]$ - исходные данные;

$F_{R1h} = [F(1), F(1+h), F(1+2h), \dots, F(1+(R-1)h)]$ - результат преобразования;

$M_1 = \text{диаг.}[W_N^0, W_N^1, W_N^{2^1}, \dots, W_N^{(N-1)}]$;

$W_N^{n^1} = e^{-j \frac{2\pi}{N} n^1}$;

$I_{\sigma T, h}$ - столбец из h единиц;

$$W_{N-h} = \begin{bmatrix} W_N^0 & W_N^0 & W_N^0 & \dots & W_N^0 \\ W_N^0 & W_N^h & W_N^{2h} & \dots & W_N^{(R-1)h} \\ W_N^0 & W_N^{2h} & W_N^{4h} & \dots & W_N^{(R-1)2h} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_N^0 & W_N^{N-h} & W_N^{2(N-h)} & \dots & W_N^{(R-1)(N-h)} \end{bmatrix};$$

$$\text{где } W_N^{nh} = e^{-j \frac{2\pi}{N} nh}.$$

Модифицированное дискретное преобразование Фурье реализовано в три этапа.

1. Суммирование элементов массива исходных данных $Z=[Z(0), Z(1), Z(2), \dots, Z(N-1)]$ ($N=2^6$) согласно выражениям:

$$F_1(k, i, m) = \sum_{l=0}^{k_2-1} Z \left[\frac{N(8l+m)}{8k_2} + i \right],$$

$$F_2(k, i, m) = \sum_{l=0}^{k_2-1} Z \left[\frac{N(8l+m+1)}{8k_2} - i - 1 \right],$$

$$\text{где } i = 0, \frac{N}{16k_2} - 1;$$

$$m = 0, 7;$$

$$k = k_1 k_2 \text{ (} k_1 \text{ - нечетное, } k_2 = 2^5 \text{)}.$$

2. Домножение результатов первого этапа на $\left(\frac{\sqrt{2}}{2} (1-j)\right)^{mk_1}$:

$$F_3(k, i) = \sum_{m=0}^7 F_1(k, i, m) \left(\frac{\sqrt{2}}{2} (1-j)\right)^{mk_1},$$

$$F_4(k, i) = \sum_{m=0}^7 F_2(k, i, m) \left(\frac{\sqrt{2}}{2} (1-j)\right)^{mk_1},$$

$$\text{где } i = 0, \frac{N}{16k_2} - 1.$$

3. Формирование окончательного результата преобразования:

$$F(k) = \sum_{i=0}^{\frac{N}{16k_2}-1} (F_3(k, i) W_N^{ik} + F_4(k, i) \left(\frac{\sqrt{2}}{2} (1-j)\right) W_N^{-ik}).$$

Число нетривиальных умножений при определении R коэффициентов ДПФ методом МДПФ равно

$$M_{\text{МДПФ}} = R \left(\frac{N}{8} - 1 \right).$$

Модифицированное быстрое преобразование Фурье реализовано за четыре этапа.

1. Определение массива частотномодулированных данных $Z^{(1)} = [Z^{(1)}(0), Z^{(1)}(1), Z^{(1)}(2), \dots, Z^{(1)}(N-1)]$ путем частотного сдвига массива исходных данных $Z=[Z(0), Z(1), Z(2), \dots, Z(N-1)]$

($N=2^B$) согласно выражению

$$Z^{(1)}(n) = Z(n) W_N^{n1},$$

где $n = \overline{0, N-1}$.

2. Суммирование в массиве $Z^{(1)}$ всех элементов $Z^{(1)}(n)$ ($n = \overline{0, N-1}$), отстоящих друг от друга на $\frac{N}{h}$:

$$Z^{(h)}(n) = \sum_{m=0}^{h-1} Z^{(1)}\left(n+m \frac{N}{h}\right),$$

где $n = \overline{0, \frac{N}{h}-1}$.

Результат построчно записывается в виде двумерного массива $Z^{(h)}$:

$$Z^{(h)} = \begin{bmatrix} Z^{(h)}\left(0\right) & Z^{(h)}\left(1\right) & Z^{(h)}\left(2\right) & \dots & Z^{(h)}\left(\frac{N}{Rh}-1\right) \\ Z^{(h)}\left(\frac{N}{Rh}\right) & Z^{(h)}\left(\frac{N}{Rh}+1\right) & Z^{(h)}\left(\frac{N}{Rh}+2\right) & \dots & Z^{(h)}\left(\frac{2N}{Rh}-1\right) \\ Z^{(h)}\left(\frac{2N}{Rh}\right) & Z^{(h)}\left(\frac{2N}{Rh}+1\right) & Z^{(h)}\left(\frac{2N}{Rh}+2\right) & \dots & Z^{(h)}\left(\frac{3N}{Rh}-1\right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z^{(h)}\left(\frac{R-1}{Rh}N\right) & Z^{(h)}\left(\frac{R-1}{Rh}N+1\right) & Z^{(h)}\left(\frac{R-1}{Rh}N+2\right) & \dots & Z^{(h)}\left(\frac{N}{h}-1\right) \end{bmatrix}.$$

3. Формирование матрицы F' как результат БПФ с основанием R над столбцами матрицы $Z^{(h)}$:

$$F' = \begin{bmatrix} F'(0,0) & F'(0,1) & F'(0,2) & \dots & F'(0, \frac{N}{Rh}-1) \\ F'(1,0) & F'(1,1) & F'(1,2) & \dots & F'(1, \frac{N}{Rh}-1) \\ F'(2,0) & F'(2,1) & F'(2,2) & \dots & F'(2, \frac{N}{Rh}-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ F'(R-1,0) & F'(R-1,1) & F'(R-1,2) & \dots & F'(R-1, \frac{N}{Rh}-1) \end{bmatrix}.$$

4. Формирование результата преобразования Фурье $F_{N/R} = \{F(1), F(1+h), F(1+2h), \dots, F(1+(R-1)h)\}$ согласно выражению:

$$F(1+1h) = \sum_{t=0}^{\frac{N}{Rh}-1} F'(1,t) W_N^{1t},$$

где $1 = \overline{0, R-1}$.

Число нетривиальных умножений, необходимых при реализации МБПФ

$$M_{\text{МБФ}} = \frac{N}{l_2} - 6 + \frac{N}{2h} ((\log_2 R) - 3) + \frac{2N}{Rh} + (R-1) \left(\frac{N}{Rh} - 1 \right),$$

где $l_2 = \frac{1}{l_1}$ (l_1 - нечетное, $l_2 = 2^B$).

Модифицированное БФ без фазового сдвига данных реализовано в три этапа.

1. Определение коэффициентов $Z'(n_1)$ согласно выражению:

$$Z'(n_1) = \sum_{n_2=0}^{h-1} Z(n_1 + \frac{N}{h} n_2),$$

где $n_1 = 0, \frac{N}{h} - 1$.

2. Вычисление промежуточных данных $F(1+h(\text{Mod}_R(R+P-\frac{1}{h})), s)$ согласно выражению

$$F(1+h(\text{Mod}_R(R+P-\frac{1}{h})), s) = \sum_{t=0}^{R-1} Z''(s+t \frac{N}{Rh}) W_R^{tP},$$

где $Z''(s+t \frac{N}{Rh}) = Z'(s+t \frac{N}{Rh}) W_N^{a(1+ih)}$;

$s = 0, \frac{N}{Rh} - 1$;

$t = 0, R-1$;

$P = 1 + \frac{1}{h}$;

$1 = 0, R-1$.

Данное выражение реализуется с помощью $\frac{N}{Rh}$ преобразований Фурье над массивами из R элементов по одному из известных БФ-алгоритмов с разложением по основанию 2.

3. Нахождение искоемых коэффициентов преобразования Фурье

$$F(1+ih) = \sum_{s=0}^{\frac{N}{Rh}-1} F(1+ih, s),$$

где $1 = 0, R-1$.

Число нетривиальных умножений, необходимых при реализации МБФБФС

$$M_{\text{МБФБФС}} = \frac{N}{2h} (\log_2 R - 1) + \frac{2N}{Rh} - R.$$

Если число определяемых коэффициентов ДФ $R=4^B$, то первый и третий этапы МБФБФС можно оставить без изменений, а на втором этапе использовать БФ-алгоритм с разложением по основанию 4.

Число нетривиальных умножений, необходимых при реализации

МЕПФБС с использованием на втором этапе БПФ-алгоритма с разложением по основанию 4 (МЕПФБС4)

$$M_{\text{МЕПФБС4}} = \frac{3N}{8h} \log_2 R - \frac{N}{8h} + \frac{2N}{Rh} - R.$$

"Деформируемое" быстрое преобразование Фурье реализовано за четыре этапа.

1. Определение $Z'(n_1)$ согласно выражению

$$Z'(n_1) = \sum_{n_2=0}^{h-1} Z(n_1 + n_2 \frac{N}{h}),$$

$$\text{где } n_1 = 0, \frac{N}{h} - 1.$$

2. Вычисление $Z''(s + t_1 \frac{N}{Rh})$ и $Z''(s + (\frac{R}{2} + t_1) \frac{N}{Rh})$ согласно выражений

$$Z''(s + t_1 \frac{N}{Rh}) = [Z'(s + t_1 \frac{N}{Rh}) + (-1)^{\frac{1}{h}} Z'(s + (\frac{R}{2} + t_1) \frac{N}{Rh})] W_R^{t_1 (\frac{1}{h})},$$

$$Z''(s + (\frac{R}{2} + t_1) \frac{N}{Rh}) = [Z'(s + t_1 \frac{N}{Rh}) - (-1)^{\frac{1}{h}} Z'(s + (\frac{R}{2} + t_1) \frac{N}{Rh})] W_R^{t_1 (1 + \frac{1}{h})},$$

$$\text{где } t_1 = 0, \frac{R}{2} - 1;$$

$$s = 0, \frac{N}{Rh} - 1.$$

3. Определение $F(1 + 2i_1 h, s)$ и $F(1 + (2i_1 + 1)h, s)$ согласно выражений:

$$F(1 + 2i_1 h, s) = \sum_{t_1=0}^{\frac{R}{2}-1} Z''(s + t_1 \frac{N}{Rh}) W_R^{t_1 \frac{1}{2}},$$

$$F(1 + (2i_1 + 1)h, s) = \sum_{t_1=0}^{\frac{R}{2}-1} Z''(s + (\frac{R}{2} + t_1) \frac{N}{Rh}) W_R^{t_1 \frac{1}{2}},$$

$$\text{где } i_1 = 0, \frac{R}{2} - 1;$$

$$s = 0, \frac{N}{Rh} - 1.$$

Данное выражение следует реализовать с помощью известных алгоритмов БПФ, например, методом БПФ с минимальным числом умножений.

4. Определение искомых коэффициентов ДПФ согласно выражению

$$F(1+ih) = \sum_{s=0}^{\frac{N}{Rh}-1} F(1+ih, s) W_N^{\frac{s}{h} \left(\frac{1}{h}+1\right)},$$

где $1 = 0, R-1$.

Число нетривиальных умножений, необходимых при реализации ДБФ с использованием на третьем этапе БФ с минимальным числом умножений

$$M_{\text{ДБФ}} = \frac{N}{2h} \log_2 R + \frac{4N}{Rh} - R.$$

В табл. приведены числа комплексных операций типа "Умножение", необходимых при вычислении коэффициентов ДФ $F_{Rih} = [F(1), F(1+h), F(1+2h), \dots, F(1+(R-1)h)]$ с помощью метода БФ с минимальным числом умножений и методами БФ с "деформируемой" осью частот при $N=1024$, $h=2$ в зависимости от числа определяемых коэффициентов R .

Таблица 1.

Метод \ R	8	16	32	64	128
БФ	3586	3586	3586	3586	3586
МДФ	1016	2032	4064	8128	16256
МБФ	1203	1291	1515	1731	1919
МБФБФС	632	816	1040	1232	1416
МБФБФС4	-	752	-	1040	-
ДБФ	1016	1136	1312	1504	1680

Как видно из табл. 1, наибольшие вычислительные затраты требуются при реализации МДФ, поэтому его рекомендуется применять только в двух случаях:

- при числе определяемых коэффициентов Фурье $R < \frac{N}{64}$, если они следуют с постоянным шагом h ;
- при $R < \log_{1,3} N$, если они расположены произвольно.

Минимальные вычислительные затраты требуются при реализации МБФБФС4, если $R=4^g$ и МБФБФС, если $R=2 \times 4^g$ (см. табл. 1), однако МБФБФС и МБФБФС4 имеют наиболее сложную аппаратную и програм-

мную реализацию.

Наиболее просто составить программу и разработать схему процессора для реализации МДФ и МБФ.

Основное преимущество МДФ – с его помощью можно определять коэффициенты Фурье, как и при непосредственной реализации ДФ, независимо друг от друга, но, по сравнению с последней, МДФ обеспечивает быстроедействие в среднем в 8 раз выше.

В диссертации разработана методика, являющаяся математическим ядром методов БФ с "деформируемой" осью частот. На ее основе выведены четыре метода: МДФ, МБФ, МБФБФС и ДБФ, рассмотренные выше. Выбор метода БФ для конкретной вычислительной системы зависит от числа определяемых коэффициентов Фурье и формы его реализации: аппаратная или программная.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ проведена разработка и анализ трех архитектур вычислительных устройств для реализации БФ с "деформируемой" осью частот: специализированное цифровое вычислительное устройство для обработки информации на микросхемах серии 585, сопроцессор БФ на базовых матричных кристаллах (БМК) и сопроцессор БФ на микросхемах серии 1838, а также рассмотрена архитектура поразрядного умножителя для БФ-процессоров.

Результаты анализа архитектур БФ-процессоров приведены в табл. 2.

Наличие большого числа микросхем в СЦВУОИ на 585-ой серии объясняется тем, что это автономная микро-ЭВМ, содержащая ПЗУ на 68-ми микросхемах и оперативную память на четырех микросхемах.

Вычислительные устройства на БМК КМОП и серии 1838 являются сопроцессорами и, поэтому своих ПЗУ и оперативной памяти не имеют.

Как видно из табл. 2, минимальные аппаратные затраты имеет сопроцессор БФ на БМК КМОП, а максимальное быстроедействие обеспечивает сопроцессор на микросхемах серии 1838.

Минимальную стоимость имеет СЦВУОИ, так как все входящие в его состав микросхемы сравнительно дешевые. С помощью СЦВУОИ, в отличие от сопроцессоров, можно реализовать не только преобразование Фурье, но и многие другие задачи цифровой обработки информации.

Описанный в третьей главе поразрядный умножитель работает в два этапа:

1. с помощью вентиля формируются поразрядные произведения;
2. с помощью древовидной схемы, состоящей из сумматоров и вы-

Таблица 2.

Основная серия микросхем			БМК КМОП	1838	585
Число кристаллов БМК КМОП			7	—	—
Число серийных микросхем			5	32	131
Число реализаций преобразо- вания Фурье за 1 с при N=1024, h=2 и четных l	БПФ	R=8	651	1220	4,9
		R=64	651	1220	4,9
	МДПФ	R=8	2167	5230	45,4
		R=64	271	654	5,7
	МБПФ	R=8	2061	3925	14,8
		R=64	1431	2712	10,4
	МБПФБФС	R=8	3123	6109	25
		R=64	1787	3503	14,2
ДБПФ	R=8	2066	3925	16,2	
	R=64	1433	2712	11,1	

четателей, определяется результат умножения.

Благодаря применению в умножителе древовидной схемы, содержащей вычитатели, и отсутствию на его выходе многоразрядного сумматора повышается быстродействие в два раза и сокращаются аппаратные затраты на 20%. На схему умножителя оформлено изобретение [7]. Умножитель использован при разработке сопроцессора БПФ на БМК КМОП.

В вычислительных схемах, где требуется высокое быстродействие реализации преобразования Фурье рекомендуется использовать сопроцессор БПФ на БМК КМОП либо на микросхемах серии 1838.

В вычислительных устройствах, где наряду с реализацией преобразования Фурье, необходимо решать другие задачи цифровой обработки информации и не требуется высокое быстродействие, но необходимы минимальные аппаратные затраты, рекомендуется применять СБВУОИ.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена вопросам разработки и анализа программ, реализующих БПФ с "деформируемой" осью частот на универсальных ЭВМ.

Разработаны программы, реализующие МДПФ и МБПФ на языке Турбо-Паскаль и проведен их анализ по быстродействию.

В завершающем главу параграфе дана характеристика внедрения и апробации результатов диссертационной работы, содержатся рекомендации по применению методов БПФ с "деформируемой" осью частот. Особенно эффективно их применение в тех случаях, когда требуется высокое быстродействие в сочетании со сравнительно небольшими аппаратурными затратами и потребляемой мощностью, например в бортовых системах цифровой обработки информации, работающих в реальном масштабе времени.

В **ПРИЛОЖЕНИЯХ** рассмотрена вычислительная система с БПФ-процессором и приведены разработанные на языке Турбо-Паскаль программы для реализации МДПФ и МБПФ. Представлены акты внедрения диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ методов БПФ и обоснована актуальность преобразований Фурье с "деформируемой" осью частот.

2. Предложена методика, составившая математическое ядро для синтеза БПФ с "деформируемой" осью частот.

3. Разработаны и проанализированы по критериям быстродействия и аппаратурным затратам четыре метода реализации БПФ: МДПФ, МБПФ, МБПФБЭС и ДБПФ. Применение МДПФ позволило сократить в 4 раза аппаратурные затраты в систолических ДПФ-процессорах. МБПФ, МБПФБЭС и ДБПФ обеспечили быстродействие более, чем в 2 раза выше, по сравнению с известными БПФ-алгоритмами.

4. Предложены три схемы вычислительных устройств для реализации БПФ с "деформируемой" осью частот.

5. Разработана схема умножителя для БПФ-процессор, позволившая сократить аппаратурные затраты на 20 % и повысить быстродей-

ствие в 2 раза.

6. Создан и проанализирован по быстродействию пакет прикладных программ БПФ с "деформируемой" осью частот в сравнении с известными БПФ-программами.

7. Внедрение на Калужском приборостроительном заводе "Тайфун" МБПФ и СВУОИ позволило в системе управления устройством отображения визуальной информации сократить аппаратные затраты на 40% , потребляемую мощность на 30% и повысить быстродействие в 2 раза. Программа, реализующая МБПФ, использовалась на Калужском приборостроительном заводе "Тайфун" при испытании на помехоустойчивость работы обратного канала кабельного телевидения.

МДПФ и МБПФ были использованы при разработке экспериментального образца цифрового блока выделения сигналов в КБМ (г. Коломна).

Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

СПИСОК РАБОТ

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах.

1. Бримов В. В. Реализация быстрого преобразования Фурье с "деформируемой" осью частот для систем обработки изображений.
2. Применение статистических методов в производстве и управлении: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции с международным участием стран членов СЭВ. - Пермь, 1990. - Т. 2. - С. 306.
3. Бримов В. В. Метод реализации быстрого преобразования Фурье на произвольных частотах. - Рукопись представлена Московским Государственным Техническим Университетом им. Н. Э. Баумана // Деп.рук.в ВИНИТИ. - 11.01.91. - № 200. - 5 с.
4. Бримов В. В. Метод реализации быстрого преобразования

Фурье с "деформируемой" осью частот. - Рукопись представлена Московским Государственным Техническим Университетом им. Н. Э. Баумана // Деп. рук. в ВИНТИ.- 11.01.91.- № 201.- 5 с.

4. Ефимов В. В. Метод параллельного умножения с высоким быстродействием // Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники: Тезисы докладов Всесоюзной конференции НТМ и студентов.- М., 1989.- Т. 1.- С. 109.

5. Ефимов В. В. Методы повышения быстродействия при выполнении арифметических операций в системах цифровой обработки информации // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического и машинного моделирования: Тезисы докладов Всесоюзной конференции.- Тамбов, 1989.- С. 22.

6. Ефимов В. В., Курганов В. Д. Применение поразрядных умножителей при реализации БПФ // Труды Хабаровского Политехнического института.- Хабаровск, 1989.- С. 22.

7. А. с. 87904 СССР, МКИ³ G 06. Устройство для умножения в дополнительном коде. / В. В. Ефимов (СССР). - № 4881342/24.