

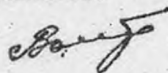
ВИННИЦКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Вольнец Виктор Иванович

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
ДЛЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА

Специальность 05.11.16 - информационно-измерительные системы
(в науке и промышленности)



А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Винница - 1991

Работа выполнена на кафедре микроэлектроники Винницкого политехнического института.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Осадчук В.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Кадук Б.Г.,
кандидат технических наук,
доцент Жданов В.Д.


Ведущая организация: Конструкторское бюро "Машиностроение"
(г.Коломна Московской области).

Защита диссертации состоится 21 декабря 1991 г.
в 10-00 час. на заседании специализированного совета
К 069.34.01 в Винницком политехническом институте по адресу:
285021, г.Винница, Хмельницкое шоссе, 93, ВПИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВПИ.

Автореферат разослан "20" ноября 1991 г.

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

 С.В.Джимчук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Информационно-измерительные системы (ИИС) цифровой обработки сигналов (ЦОС), предназначенные для решения задач спектрально-корреляционного анализа, цифровой фильтрации, кодирования и сжатия информации, классификации и распознавания образов, находят широкое применение во многих областях науки и техники, таких как управление, связь, радио- и гидролокация, акустика, астрономия, сейсмология, биомедицина, вибродиагностика, цифровая голография, обработка изображений.

Эффективность ИИС ЦОС во многом определяется эффективностью используемых алгоритмов ЦОС, многие из которых базируются на разнообразных дискретных ортогональных преобразованиях, наибольшее распространение среди которых находит дискретное преобразование Фурье (ДФ).

В последнее время большое внимание уделяется дискретному преобразованию Хартли (ДПХ), тесно связанному с ДФ. В отличие от ДФ ДПХ имеет ряд преимуществ, к числу которых относятся отсутствие комплексной арифметики для его выполнения и тождественность его прямого и обратного преобразований с точностью до фиксированного множителя.

Однако, если для вычисления ДФ разработано большое количество быстрых алгоритмов вычисления, получивших название алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ), то для вычисления ДПХ разработаны и исследованы лишь эффективные алгоритмы быстрого преобразования Хартли (БПХ) по основанию 2. В связи с этим представляется целесообразным разработать и исследовать алгоритмы БПХ по другим, более высоким основаниям, в частности основаниям 4, 8 и с расщепленным основанием.

Особым случаем является вычисление ДФ и ДХ на скачущих (скользящих) интервалах. Известны рекуррентные алгоритмы вычисления ДФ на скачущих (скользящих) интервалах, а также рекуррентные алгоритмы вычисления энергетического спектра на базе ДХ на скользящих интервалах. Однако, отсутствуют рекуррентные алгоритмы вычисления ДХ и энергетического спектра на базе ДФ и ДХ на скачущих (скользящих) интервалах.

Наряду с разработкой и исследованием эффективных алгоритмов ЦОС большое внимание должно быть уделено разработке ИИС ЦОС на современной элементной базе. Применение микропроцессоров для разработки ИИС ЦОС позволило существенно расширить область применения последних. Однако, использование известных микропроцессорных комплектов ставит ряд проблем, к числу которых относится разработка устройств, выполняющих обмен информации между составными частями ИИС ЦОС и обеспечивающих максимальную производительность системы в целом. Кроме того, важное место отводится эффективной программной реализации алгоритмов ЦОС, учитывающей особенности используемых алгоритмов и микропроцессоров.

Таким образом, разработка эффективных алгоритмов и ИИС ЦОС является важной и актуальной задачей.

Рассмотренные в диссертационной работе вопросы направлены на решение проблем, определенных координационным планом "Фундаментальные исследования в области ММ и субММ волн и использование их результатов в народном хозяйстве", утвержденным бюро отделения физики и астрономии АН УССР № 59/36 (протокол № 1, §13 от 6.01.86).

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является разработка и исследование эффективных алгоритмов, программ и структурных схем микропроцессорных анализаторов спектра.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- разработка эффективных алгоритмов БПХ по основаниям 4, 8 и с расщепленным основанием с прореживанием по времени и частоте и проведение сравнительного анализа по количеству арифметических операций и объему требуемой памяти;

- разработка рекуррентных алгоритмов вычисления ДПХ и энергетического спектра на скачущих (скользящих) интервалах и проведение сравнительного анализа по количеству арифметических операций и объему требуемой памяти;

- исследование точности алгоритмов БПФ и БПХ с фиксированной запятой и проведение их сравнительного анализа;

- разработка эффективных программных реализаций алгоритмов спектрального анализа, учитывающих особенности используемых алгоритмов и микропроцессоров;

- разработка структурных и функциональных схем устройств, выполняющих обмен информации между составными частями микропроцессорных ИИС ЦОС, которые обеспечивают максимальную производительность последних;

- реализация разработанных структурных и функциональных схем обмена информации, а также программных реализаций алгоритмов спектрального анализа в микропроцессорных анализаторах спектра.

Методы исследований. Для решения поставленных задач в работе используются теория ЦОС, аппарат матричной алгебры, теория вероятностей и математической статистики, теоретические основы проектирования цифровой вычислительной техники.

Научная новизна. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- разработаны эффективные алгоритмы БПХ по основаниям 4, 8 и с расщепленным основанием с прореживанием по времени и частоте,

3

которые по комплексному критерию превосходят аналогичные алгоритмы БПФ для обработки вещественных последовательностей в 3 раза, а алгоритмы БПФ для обработки комплексных последовательностей - в 4,1 раза;

- разработаны рекуррентные алгоритмы вычисления ДПХ и энергетического спектра на скачущих (скользящих) интервалах, которые превосходят алгоритмы БПХ, обеспечивая максимальный выигрыш при вычислении на скользящих интервалах, который для размера преобразования $N = 1024$ составляет 2,34 и 5,15 раза соответственно по количеству операций вещественного умножения и сложения относительно алгоритмов БПХ с разделенным основанием;

- исследована точность алгоритмов БПФ и БПХ по основаниям 2, 4, 8 и с разделенным основанием с прореживанием по времени и частоте с фиксированной запятой для случаев входного и автоматического масштабирования, представления чисел в прямом, обратном и дополнительном коде, аппроксимации результатов умножения путем округления и усечения.

Практическая ценность. Разработаны эффективные программные реализации алгоритмов спектрального анализа, в частности программы БПФ и БПХ на языке ассемблера микропроцессора КРБ50ИК80А с временем выполнения для $N = 1024$ соответственно 2,6 + 3,0 и 1,25 + 1,5 сек.

Разработаны структурные и функциональные схемы устройств прозрачного прямого доступа к памяти, отображения информации на экране электронно-лучевой трубки, сопряжения с периферийными устройствами, осуществляющие обмен информации в ИИС ЦОС, которые позволяют повысить их производительность в 2 раза.

Разработан автономный микропроцессорный анализатор спектра на базе микропроцессора КРБ50ИК80А, который был внедрен в ин-

ституте радиофизики и электроники АН УССР (г. Харьков). Годовой экономический эффект от внедрения составил 29,7 тыс. руб.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XII Всесоюзной конференции по микроэлектронике (г. Тбилиси, 1987 г.), Республиканской научно-технической конференции "Информатика и автоматизация в регионе" (г. Винница, 1988 г.), 3-й Всесоюзной школе "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами" (г. Харьков, 1988 г.), научно-техническом семинаре "Применение микропроцессоров, микро- и персональных ЭВМ" (г. Челябинск, 1989 г.), Международной молодежной научно-технической конференции "Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники" (г. Пушкино Московской области, 1989 г.), второй Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов с международным участием "Контроль, управление и автоматизация в современном производстве" (г. Минск, 1990 г.).

По теме диссертационной работы опубликовано 17 научных трудов, в том числе 4 авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня использованных источников из 125 наименований и приложений. Объем работы составляет 121 страниц основного текста, 32 рисунка, 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследования, отражена научная новизна и практическая ценность работы, приведена ее структура.

В первой главе проведен анализ методов и средств ЦОС, в результате чего сформулированы основные задачи исследований.

Рассмотрены ДФ и ДПХ и их использование в ИИС ЦОС. Отмечено, что использование ДПХ, тесно связанного с ДФ, имеют ряд преимуществ перед последним, к числу которых относятся отсутствие комплексной арифметики для его вычисления и тождественность его прямого и обратного преобразований с точностью до фиксированного множителя.

Поскольку сложность вычислительных алгоритмов во многом определяется количеством и видом основных вычислительных операций, проведен анализ алгоритмов комплексного умножения, в числе которых рассмотрены классический алгоритм, алгоритм билинейных форм, алгоритм Бьюнемана и алгоритм, выполняемый в поле Галуа. Показаны их преимущества и недостатки, исходя из чего должен производиться выбор того или иного алгоритма в каждом конкретном случае.

Рассмотрены эффективные алгоритмы БФ по основаниям 2, 4, 8 и с расщепленным основанием, предназначенные для обработки комплексных и вещественных последовательностей. Сравнительный анализ данных алгоритмов показал, что с ростом основания арифметическая сложность алгоритмов уменьшается, а объем требуемой памяти увеличивается. Наименьшие арифметическую сложность и объем требуемой памяти имеют алгоритмы БФ с расщепленным основанием.

Анализ эффективных алгоритмов БПХ по основанию 2 показал, что данные алгоритмы имеют одинаковые характеристики по количеству операций вещественного умножения и объему требуемой памяти по сравнению с лучшими алгоритмами БФ по основанию 2 вещественной последовательности, незначительно уступая по количеству операций вещественного сложения; они имеют простую и регулярную структуру и свободны от недостатков, присущих последним, к числу которых относятся сложность адресации данных в процессе вычислений, необходимость наличия большого количества базовых вычислительных операций и ряд других. Поэтому применение алгоритмов БПХ

является более предпочтительным. В связи с этим представляется целесообразным разработать и исследовать эффективные алгоритмы БПХ по другим более высоким основаниям, в частности основаниям 4, 8 и с расщепленным основанием.

Особым случаем является вычисление ДПФ и ДПХ на скачущих (скользящих) интервалах, т.е. когда к исходной последовательности добавляется некоторое количество новых отсчетов и такое же количество начальных отсчетов отбрасывается. Использование в этом случае алгоритмов БПФ и БПХ является неэффективным в виду того, что они не используют результаты вычислений на предыдущих интервалах. Известные рекуррентные алгоритмы вычисления ДПФ на скачущих (скользящих) интервалах обеспечивают значительный выигрыш по сравнению с алгоритмами БПФ. Поэтому актуальной является задача разработки рекуррентных алгоритмов вычисления ДПХ и энергетического спектра на скачущих (скользящих) интервалах.

Важным критерием выбора того или иного алгоритма является точность вычислений, обеспечиваемая данным алгоритмом. Анализ вычислительных ошибок алгоритмов БПФ и БПХ посвящено большое количество работ. Однако в одних из них проводился упрощенный анализ, в других – проводимый анализ слишком сложен и не нагляден. При этом анализ проводился лишь для некоторых частных случаев при реализации алгоритмов БПФ по основаниям 2, 4 и алгоритмов БПХ по основанию 2. Поэтому представляет интерес задача простого и наглядного анализа вычислительных ошибок алгоритмов БПФ и БПХ по разным основаниям, с прореживанием по времени и частоте с фиксированной запятой для случаев входного и автоматического масштабирования, с представлением чисел в прямом, обратном и дополнительном коде, с аппроксимацией результатов умножения путем округления или усечения.

Анализ микропроцессорных реализаций ИИС ЦОС показал, что важной задачей является разработка устройств, выполняющих обмен

информации между составными частями ИИС ЦОС, которые обеспечивают максимальную производительность системы. Кроме того, актуальной является задача разработки эффективных программных реализаций алгоритмов ЦОС, учитывающих особенности алгоритмов и микропроцессоров.

Во второй главе разработаны эффективные алгоритмы вычисления ДПХ и энергетического спектра, к числу которых относятся алгоритмы БПХ по основаниям 4, 8 и с расщепленным основанием с прореживанием по времени и частоте, а также рекуррентные алгоритмы вычисления ДПХ и энергетического спектра.

Алгоритмы БПХ по основанию 4 (БПХ-4) с прореживанием по времени базируется на следующей рекурсивной форме:

$$\begin{bmatrix} H(k) \\ H(\frac{N}{4}-k) \\ H(k+\frac{N}{4}) \\ H(\frac{N}{4}-k) \\ H(k+\frac{N}{2}) \\ H(\frac{3N}{4}-k) \\ H(k+\frac{3N}{4}) \\ H(N-k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & C_R & S_R & C_R & S_R & C_R & S_R \\ 0 & 1 & C_R & S_R & S_R & -C_R & -C_R & -S_R \\ 1 & 0 & -S_R & C_R & -C_R & -S_R & S_R & -C_R \\ 0 & 1 & S_R & -C_R & -S_R & C_R & S_R & -C_R \\ 1 & 0 & -C_R & -S_R & C_R & S_R & -C_R & -S_R \\ 0 & 1 & -C_R & -S_R & S_R & -C_R & C_R & S_R \\ 1 & 0 & S_R & -C_R & -C_R & -S_R & -S_R & C_R \\ 0 & 1 & -S_R & C_R & -S_R & C_R & -S_R & C_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_0(k) \\ H_0(\frac{N}{4}-k) \\ H_1(k) \\ H_1(\frac{N}{4}-k) \\ H_2(k) \\ H_2(\frac{N}{4}-k) \\ H_3(k) \\ H_3(\frac{N}{4}-k) \end{bmatrix} \quad (I)$$

где $H(k)$ - N - точечное ДПХ последовательности $x(n)$;
 $H_0(k)$, $H_1(k)$, $H_2(k)$, $H_3(k)$ - $N/4$ - точечные ДПХ соответственно последовательностей $x(4n)$, $x(4n+1)$, $x(4n+2)$ и $x(4n+3)$, $n=0, N/4-1$; $C_{[j]} = \cos(2\pi \cdot [j] \cdot N)$, $S_{[j]} = \sin(2\pi \cdot [j] \cdot N)$. Центральная матрица в выражении (I) представляется через произведение слабозаполненных матриц следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I & A & B & C \\ I & D & -B & E \\ I & -A & B & -C \\ I & -D & -B & -E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & O & I & O \\ O & I & O & I \\ I & O & -I & O \\ O & I & O & -I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I & I & O & O \\ I & -I & O & O \\ O & O & I & O \\ O & O & O & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I & O & O & O \\ O & O & B & O \\ O & A & O & C \\ O & D & O & E \end{bmatrix},$$

где I, O, A, B, C, D, E - матрицы размерности 2×2 , I - единичная матрица, O - нулевая матрица.

Алгоритм БПХ-4 с прореживанием по частоте базируется на следующей рекурсивной форме:

$$\begin{bmatrix} X_0(n) \\ X_0(\frac{N}{4}-n) \\ X_1(n) \\ X_1(\frac{N}{4}-n) \\ X_2(n) \\ X_2(\frac{N}{4}-n) \\ X_3(n) \\ X_3(\frac{N}{4}-n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \hline C_n & C_n & -S_n & S_n & -C_n & -C_n & S_n & -S_n \\ S_n & S_n & C_n & -C_n & -S_n & -S_n & -C_n & C_n \\ \hline C_{2n} & S_{2n} & -C_{2n} & -S_{2n} & C_{2n} & S_{2n} & -C_{2n} & -S_{2n} \\ S_{2n} & -C_{2n} & -S_{2n} & C_{2n} & S_{2n} & -C_{2n} & -S_{2n} & C_{2n} \\ \hline C_{4n} & -C_{4n} & S_{4n} & S_{4n} & -C_{4n} & C_{4n} & -S_{4n} & -S_{4n} \\ S_{4n} & -S_{4n} & -C_{4n} & -C_{4n} & -S_{4n} & S_{4n} & C_{4n} & C_{4n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(n) \\ x(\frac{N}{4}-n) \\ x(n+\frac{N}{4}) \\ x(\frac{N}{4}-n) \\ x(n+\frac{N}{4}) \\ x(\frac{2N}{4}-n) \\ x(n+\frac{2N}{4}) \\ x(N-n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

где $X_i(n)$, $i=0,3$, - функции, относительно которых вычисляются $N/4$ - точечные ДПХ $N(4k+i)$; $k=0, N/8$; центральная матрица в выражении (2) представляется через произведение слабо-заполненных матриц следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I & I & I & I \\ A & B & -A & -B \\ C & -C & C & -C \\ D & E & -D & -E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & O & O & O \\ O & I & O & O \\ O & O & C & O \\ O & O & O & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I & I & O & O \\ O & O & A & B \\ I & -I & O & O \\ O & O & D & E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I & O & I & O \\ O & I & O & I \\ I & O & -I & O \\ O & I & O & -I \end{bmatrix}.$$

Алгоритм БПХ с расщепленным основанием (БПХРО) с прореживанием по времени базируется на следующей рекурсивной форме:

$$\begin{bmatrix} H(k) \\ H(\frac{N}{4}-k) \\ H(k+\frac{N}{4}) \\ H(\frac{N}{2}-k) \\ H(k+\frac{N}{2}) \\ H(\frac{3N}{4}-k) \\ H(k+\frac{3N}{4}) \\ H(N-k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & CR & SR & Csk & Ssk \\ 0 & 1 & 0 & 0 & CR & SR & -Csk & -Ssk \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 & -SR & CR & Ssk & -Csk \\ 0 & 0 & 0 & 1 & SR & -CR & -Ssk & Csk \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & -CR & -SR & -Csk & -Ssk \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -CR & -SR & Csk & Ssk \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 & SR & -CR & -Ssk & Csk \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -SR & CR & -Ssk & Csk \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_0(k) \\ H_0(\frac{N}{4}-k) \\ H_0(k+\frac{N}{4}) \\ H_0(\frac{N}{2}-k) \\ H_1(k) \\ H_1(\frac{N}{4}-k) \\ H_2(k) \\ H_2(\frac{N}{4}-k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $H_0(k)$ и $H_1(k), H_2(k)$ — соответственно $N/2$ — точечное и $N/4$ — точечные ДПХ последовательностей $x(2n), n=0, N/2-1$, и $x(4n+1), x(4n+3), n=0, N/4-1$; $k=0, N/8$.

Центральная матрица в выражении (3) представляется через произведение слабозаполненных матриц следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I & 0 & A & B \\ 0 & I & C & D \\ I & 0 & -A & -B \\ 0 & I & -C & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 & I & 0 \\ 0 & I & 0 & I \\ I & 0 & -I & 0 \\ 0 & I & 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & C & D \end{bmatrix}.$$

Алгоритм ВПХФ с прореживанием по частоте базируется на следующей рекурсивной форме:

$$\begin{bmatrix} X_0(n) \\ X_0(\frac{N}{4}-n) \\ X_0(n+\frac{N}{4}) \\ X_0(\frac{N}{2}-n) \\ \hline X_1(n) \\ X_1(\frac{N}{4}-n) \\ X_2(n) \\ X_2(\frac{N}{4}-n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline C_n & C_n & -S_n & S_n & -C_n & -C_n & S_n & -S_n \\ S_n & S_n & C_n & -C_n & -S_n & -S_n & -C_n & C_n \\ \hline C_{2n} & -C_{2n} & S_{2n} & -S_{2n} & -C_{2n} & C_{2n} & -S_{2n} & -S_{2n} \\ S_{2n} & -S_{2n} & -C_{2n} & -C_{2n} & -S_{2n} & S_{2n} & C_{2n} & C_{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(n) \\ X(\frac{N}{4}-n) \\ X(n+\frac{N}{4}) \\ X(\frac{N}{2}-n) \\ \hline X(n+\frac{N}{8}) \\ X(\frac{3N}{4}-n) \\ X(n+\frac{3N}{4}) \\ X(N-n) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $X_i(n), i=0,2$ — функции относительно которых вычисляются

соответственно $N/2$ - точечное ДПХ $H(2k)$ и $N/4$ - точечные ДПХ $H(4k+1)$ и $H(4k+3)$; $k = \overline{0, N/8}$. Центральная матрица в выражении (4) представляется через произведение слабо-заполненных матриц следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I & 0 & I & 0 \\ 0 & I & 0 & I \\ A & B & -A & -B \\ C & D & -C & -D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & I & 0 \\ 0 & I & 0 & I \\ I & 0 & -I & 0 \\ 0 & I & 0 & -I \end{bmatrix}$$

Аналогичным образом определяются алгоритмы БПХ по основанию 8 (БПХ-8) с прореживанием по времени и частоте.

Представлены граф-схемы разработанных алгоритмов. Данные алгоритмы имеют простую и регулярную структуру, выполняются с замещением и позволяют использовать эффективные вычислительные процедуры, сводящие к минимуму вычислительные затраты, в результате чего они являются максимально пригодными для микропроцессорной реализации.

Сравнительный анализ алгоритмов БПХ по арифметической сложности и объему требуемой памяти показал, что наилучшими среди них являются алгоритмы БПХFO, которые для $N = 1024$ обеспечивают выигрыш в 1,43 и 1,17 раза соответственно по количеству операций вещественного умножения и сложения по сравнению с алгоритмами БПХ-2. Алгоритмы БПХ вдвое превосходят аналогичные алгоритмы БПФ комплексной последовательности и имеют одинаковые характеристики по сравнению с лучшими алгоритмами БПФ вещественной последовательности, незначительно уступая последним по количеству операций вещественного сложения.

Рекуррентные алгоритмы вычисления ДПХ на скачущих и скользящих интервалах имеют соответственно следующий вид:

$$H_1(k) = [H_0(k) + \sum_{n=0}^{m-1} [x(N+n) - x(n)] \cos \frac{2\pi nk}{N}] \cdot \cos \frac{2\pi mk}{N} -$$

$$- [H_0(N-k) + \sum_{n=0}^{m-1} [x(N+n) - x(n)] \cos \frac{2\pi n(N-k)}{N}] \cdot \sin \frac{2\pi mk}{N}, \quad k = \overline{0, N-1}; \quad (5)$$

$$H_2(k) = [H_0(k) + [x(N) - x(0)]] \cdot \cos \frac{2\pi k}{N} -$$

$$- [H_0(N-k) + [x(N) - x(0)]] \cdot \sin \frac{2\pi k}{N}, \quad k = \overline{0, N-1}, \quad (6)$$

где $H_1(k)$ и $H_0(k)$ - соответственно ДПХ на исследуемом и предыдущем интервалах, m - шаг скольжения.

Рекуррентные алгоритмы вычисления энергетического спектра на скачущих и скользящих интервалах имеют соответственно следующий вид:

$$|F_1(k)|^2 = \{ [H_0(k) + \sum_{n=0}^{m-1} [x(N+n) - x(n)] \cos \frac{2\pi nk}{N}]^2 +$$

$$+ [H_0(N-k) + \sum_{n=0}^{m-1} [x(N+n) - x(n)] \cos \frac{2\pi n(N-k)}{N}]^2 \} / 2, \quad k = \overline{0, N-1}; \quad (7)$$

$$|F_2(k)|^2 = \{ [H_0(k) + [x(N) - x(0)]]^2 +$$

$$+ [H_0(N-k) + [x(N) - x(0)]]^2 \} / 2, \quad k = \overline{0, N-1}, \quad (8)$$

где $|F_1(k)|^2$ - энергетический спектр на исследуемом интервале.

Рекуррентные алгоритмы вычисления ДПХ превосходят алгоритмы БПХ, обеспечивая максимальный выигрыш при вычислении на

скользящих интервалах, который для $N = 1024$ составляет 2,34 и 5,15 раза соответственно по количеству операций вещественного умножения и сложения.

В третьей главе исследована точность алгоритмов БПФ и БПХ по основаниям 2, 4, 8 и с расщепленным основанием с прореживанием по времени и частоте с фиксированной запятой для случаев входного и автоматического масштабирования, представления чисел в прямом, обратном и дополнительном коде, аппроксимации результатов умножения путем округления и усечения.

В основу анализа точности алгоритмов БПФ и БПХ был положен статистический метод анализа, при котором каждому источнику элементарной ошибки ставится в соответствии независимый генератор белого шума с дисперсией и математическим ожиданием ошибки, являющийся случайной величиной и принимаются следующие допущения: все источники элементарных ошибок не коррелируют с входным сигналом, все источники элементарных ошибок не коррелируют друг с другом. В качестве элементарных ошибок различают ошибки умножения, обусловленные округлением либо усечением результатов произведений, и ошибки сдвига, обусловленные процедурой масштабирования, вводимой с целью устранения возможного переполнения.

Анализ граф-схем алгоритмов БПФ и БПХ с источниками вычислительных ошибок показал, что среднеквадратическое значение (СКЗ) ошибки в выходной точке алгоритма может быть определено на основании следующих выражений соответственно для случаев входного и автоматического масштабирования:

$$M([E(N)]^2) \approx \sum_p M([E_y(p)]^2) ; \quad (9)$$

$$M(\{\varepsilon(k)\}^2) \approx \sum_{\rho} M(\{\varepsilon_y(\rho)\}^2) \cdot (1/z)^{2b(\rho)} + \sum_{s} M(\{\varepsilon_c(s)\}^2) \cdot (1/z)^{2d(s)}, \quad (10)$$

где $M(\{\varepsilon(k)\}^2)$, $M(\{\varepsilon_y(\rho)\}^2)$, $M(\{\varepsilon_c(s)\}^2)$ — соответственно СКЗ ошибки в выходной точке алгоритма $\varepsilon(k)$, ошибки умножения ε_y и ошибки сдвига ε_c ; z — основание алгоритма; $b(\rho)$ и $d(s)$ — показатели, зависящие от места возникновения ρ -ой ошибки умножения и s -ой ошибки сдвига соответственно. При этом ошибки в алгоритмах БПФ являются комплексными, а в алгоритмах БПХ — вещественными.

Основываясь на выше приведенных выражениях и используя ряд утверждений, были определены СКЗ индивидуальных и средних ошибок на выходе алгоритмов. В качестве количественной оценки точности были определены отношения средних СКЗ ошибок $M_{\text{ош}}$ к СКЗ сигнала M_c на выходе алгоритмов. Полученные результаты для случаев представления чисел в прямом, обратном и дополнительном коде с округлением результатов произведений в зависимости от длины преобразования N и длины разрядной сетки, за исключением знакового бита, b представлены в табл. I.

Анализ точности алгоритмов БПФ и БПХ показал, что точность алгоритмов БПХ при входном масштабировании вдвое выше точности аналогичных алгоритмов БПФ, а при автоматическом масштабировании алгоритмы БПХ и БПФ обеспечивают одинаковую точность. При входном масштабировании точность алгоритмов с прореживанием по времени выше точности алгоритмов с прореживанием по частоте. При этом наилучшую точность среди алгоритмов с прореживанием по времени обеспечивают алгоритмы по основанию 2, а среди алгоритмов с прореживанием по частоте — алгоритмы по основанию 8. При автоматическом масштабировании точность алгоритмов с прореживанием по

Таблица I

Точность алгоритмов БПФ и БПХ ($M_{\text{опт}}/M_c$)

Вид алгоритма	Входное масштабирование		Автоматическое масштабирование	
	БПФ	БПХ	БПФ и БПХ	
Прореживание по времени	Основание 2	$\frac{1}{6} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{1}{12} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$5N \cdot 2^{-2b}$
	Основание 4	$\frac{11}{60} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{11}{120} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$11N \cdot 2^{-2b}$
	Основание 8	$\frac{13}{24} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{13}{48} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{165}{8} N \cdot 2^{-2b}$
	Расцепленное основание	$\frac{2}{9} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{2}{18} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{12}{5} N \cdot 2^{-2b}$
Прореживание по частоте	Основание 2	$\frac{1}{8} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{1}{4} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{19}{6} N \cdot 2^{-2b}$
	Основание 4	$\frac{1}{4} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{1}{8} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{421}{60} N \cdot 2^{-2b}$
	Основание 8	$\frac{11}{58} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{11}{116} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{1129}{72} N \cdot 2^{-2b}$
	Расцепленное основание	$\frac{1}{5} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{1}{10} N^2 \cdot 2^{-2b}$	$\frac{29}{9} N \cdot 2^{-2b}$

частоте выше точности алгоритмов с прореживанием по времени. Наилучшую точность среди алгоритмов с прореживанием по частоте обеспечивают алгоритмы по основанию 2, а среди алгоритмов с прорежи-

ванием по времени - алгоритмы с расщепленным основанием. Алгоритмы с расщепленным основанием обеспечивают точность близкую к точности лучших алгоритмов при прореживании по времени и частоте в случаях входного и автоматического масштабирования.

Четвертая глава посвящена вопросам программного и аппаратного обеспечения микропроцессорных анализаторов спектра.

Рассмотрена организация выполнения алгоритмов БПФ и БПХ на примере алгоритмов по основанию 2 и с расщепленным основанием и разработаны их программы на языке ассемблера микропроцессора КР580МК80А. Результаты анализа разработанных программ представлены в табл.2.

Таблица 2

Характеристики программ БПФ и БПХ

Показатель	БПФ-2	Действит. с исполъ- зованием БПФ-2	БПХ-2	БПФ0	Действит. с исполъ- зованием БПФ0	БПХ0
Время выполнения, сек ($N = 1024$)	3,0	1,6	1,5	2,6	1,4	1,25
Объем кодов программы, байт	300	965	470	880	1245	715

На основе данных табл. 2 и результатов, полученных в предыдущих главах, для оценки объемов требуемой памяти и точности алгоритмов оценена вычислительная эффективность алгоритмов БПХ относительно алгоритмов БПФ по комплексному критерию эффективности

$$\rho = \frac{T_{БПФ}}{T_{БПХ}} \cdot \frac{\delta_{БПФ}}{\delta_{БПХ}} \cdot \frac{S_{БПФ}}{S_{БПХ}} \cdot R, \quad (11)$$

где $T_{БПХ}$, $\delta_{БПХ}$ и $S_{БПХ}$ - соответственно время вы-

полнения, отношение шум/сигнал и требуемый объем памяти в алгоритмах БПХ; $T_{БПФ}$, $S_{БПФ}$ и $S_{БПФ}$ - аналогичные параметры алгоритмов БПФ; R - параметр, характеризующий обратимость алгоритмов ($R = 2$ для алгоритмов БПФД и $R = 1$ - для остальных).

В случае автоматического масштабирования алгоритмы БПХ в 2,6 + 3,0 раза превосходят алгоритмы БПФ для обработки вещественной последовательности и в 3,7 + 4,1 раза - алгоритмы БПФ для обработки комплексной последовательности.

Описан микропроцессорный анализатор спектра на базе микропроцессора КР6801К80А. Анализатор предназначен для определения энергетического спектра вещественных сигналов и его визуализации на экране монитора. Он имеет три фиксированных режима работы для обработки сигналов в разных полосах частот и позволяет отобразить на экране монитора две последовательные гистограммы энергетического спектра, каждая из которых содержит 128 равномерно распределенных в обрабатываемой полосе частот гармоник.

Анализатор состоит из трех основных модулей: ввода исходной информации, вычислителя энергетического спектра и вывода результатов обработки на экран монитора.

Максимальное быстродействие анализатора достигается за счет использования устройства прямого доступа к памяти (ПДП), осуществляющего ввод исходной информации в режиме ПДП параллельно с работой микропроцессора и устройства для вывода информации на экран электронно-лучевой трубки, работающего параллельно с микропроцессором, которые позволяют повысить производительность анализатора спектра до двух раз. Приведены структурные и функциональные схемы данных устройств и описан их принцип работы.

В основе программного обеспечения анализатора спектра лежит программная реализация эффективного алгоритма БПХ, что позволяет вычислить энергетический спектр за $\sim 0,5$ сек.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработаны эффективные алгоритмы БПХ по основаниям 4, 8 и с расщепленным основанием с прореживанием по времени и частоте, которые по комплексному критерию превосходят аналогичные алгоритмы БПФ для обработки вещественных последовательностей в 2,6 + 3 раза, а алгоритмы БПФ для обработки комплексных последовательностей - в 3,7 + 4,1 раза. Наилучшими среди алгоритмов БПХ являются алгоритмы БПХ с расщепленным основанием.

2. Разработаны рекуррентные алгоритмы вычисления ДПХ и энергетического спектра на скачущих (скользящих) интервалах. Данные алгоритмы превосходят алгоритмы БПХ, обеспечивая максимальный выигрыш при вычислении на скользящих интервалах, который для $N = 1024$ составляет 2,34 и 5,15 раза соответственно по количеству операций вещественного умножения и вещественного сложения относительно алгоритмов БПХ с расщепленным основанием.

3. Исследована точность алгоритмов БПФ и БПХ с фиксированной запятой. Точность алгоритмов БПХ при входном масштабировании вдвое выше точности аналогичных алгоритмов БПФ, а при автоматическом масштабировании алгоритмы БПХ и БПФ обеспечивают одинаковую точность. При входном масштабировании точность алгоритмов с прореживанием по времени выше точности алгоритмов с прореживанием по частоте, а при автоматическом масштабировании - наоборот. Алгоритмы с расщепленным основанием обеспечивают точность, близкую к точности лучших алгоритмов при прореживании по времени и частоте в случае входного и автоматического масштабирования.

4. Разработаны эффективные программные реализации алгоритмов ЦОС, в частности, программы БПФ и БПХ на языке ассемблера микропроцессора КР580МК80А с временем выполнения для 1024-точечной последовательности соответственно 2,6 + 3 и 1,25 + 1,5 сек.

5. Разработаны структурные и функциональные схемы устройств прозрачного ЦДП, отображения информации на экране ЭИТ, сопряжения с периферийными устройствами, которые позволяют повысить производительность ИИС ЦОС в 2 раза.

6. На основе структурных и функциональных схем устройств обмена информации, а также эффективных программных реализаций алгоритмов ЦОС разработан микропроцессорный анализатор спектра на базе микропроцессора КР5801К30А, предназначенный для оперативного спектрального анализа сигналов.

ПЕЧАТНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гикавый В.А., Вольнец В.И., Щербацкий А.Д. Дисплейный модуль с микропроцессорной системой управления // XII Всесоюзная научная конференция по микроэлектронике: Тезисы докладов, часть IV. - Тбилиси, 1987. - С.141-142.

2. Гикавый В.А., Вольнец В.И., Щербацкий А.Д. Устройство прозрачного прямого доступа к памяти в микропроцессорной системе // XII Всесоюзная научная конференция по микроэлектронике: Тезисы докладов, часть IV. - Тбилиси, 1987. - С.143 - 144.

3. Вольнец В.И., Гладко Е.К., Осадчук В.С. Модифицированный алгоритм быстрого преобразования Фурье действительной последовательности // Республиканская научно-техническая конференция "Информатика и автоматизация в регионе": Тезисы докладов. - Винница, 1988. - С.165.

4. Вольнец В.И., Гикавый В.А., Осадчук В.С. К вопросу о выборе алгоритма быстрого преобразования Фурье // Программа и аннотации докладов 3-й Всесоюзной школы "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами". - Харьков, 1988. - С.12 - 13.

5. А.с. 1434440 СССР, МКИ G 06 F 13/00. Устройство для сопряжения микропроцессора с периферийными устройствами /

В.С.Осадчук, В.А.Гикавый, В.И.Волынец, В.Ю. Мельниченко (СССР). - 2с.

6. А.с. 1434443, МИИ Г 06 F 13/00. Устройство прямого доступа к памяти / В.С.Осадчук, В.А.Гикавый, В.И.Волынец и В.Ю. Мельниченко (СССР). - 2с.

7. Волынец В.И., Гикавый В.А. Анализ вычислительных ошибок алгоритмов быстрого преобразования Фурье в системе счисления с фиксированной запятой. - Винница, 1988. - 19с. - Деп. в УкрНИИНИ 18.11.88, № 2897 - Ук88.

8. Волынец В.И. Рекуррентные алгоритмы вычисления дискретных преобразований и энергетического спектра. - Винница, 1988. - 14с. - Деп. в УкрНИИНИ 18.11.88, № 2898 - Ук88.

9. Волынец В.И., Гикавый В.А. Микропроцессорная реализация алгоритмов спектрального анализа сигналов // Научно-технический семинар "Применение микропроцессоров, микро- и персональных ЭВМ": Тезисы докладов. - Челябинск, 1989. - С.28 - 29.

10. Волынец В.И., Мельниченко В.Ю., Чаюков И.Р., Гладко Е.К. Микропроцессорная система для цифровой обработки сигналов // Научно-технический семинар "Применение микропроцессоров, микро- и персональных ЭВМ: Тезисы докладов. - Челябинск, 1989. - С.29 - 30.

11. А.с. 1488837 СССР, МИИ Г 06 F 15/336. Устройство скользящего спектрально-корреляционного анализа / Осадчук В.С., Гикавый В.А., Прокопов И.Д., Волынец В.И.(СССР). - 2с.

12. Волынец В.И., Чаюков И.Р., Мельниченко В.Ю. Микропроцессорный анализатор спектра // Международная молодежная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы информатики, управления, радиоэлектроники и лазерной техники: Сборник докладов и сообщений. - М., 1989. - С.38.

13. Положительные решения по заявке №4668140/24-24 (043664)

от 30.03.89, МНН G 06 F 3/153. Устройство для отображения информации на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) / В.И. Вольнец, В.Ю.Мельниченко, Е.К.Гладко и И.Р.Чаюков (СССР)..

14. Вольнец В.И., Гладко Е.К., Мельниченко В.Ю., Чаюков И.Р. Анализатор спектра / Приборы и техника эксперимента. - 1990. - № I - С.222.

15. Вольнец В.И. Алгоритмы быстрого преобразования Хартли по основаниям 4, 8 и с расщепленным основанием с прореживанием по времени и частоте. - Винница, 1990. - 35с. - Деп. в УкрНИИДТИ 10.04.90, № 641 - Ук90.

16. Вольнец В.И. Сравнительный анализ алгоритмов быстрого преобразования Фурье и Хартли. - Винница, 1990. - 16с.Деп. в УкрНИИДТИ 10.04.90, № 642 - Ук90.

17. Вольнец В.И., Гладко Е.К., Мельниченко В.Ю., Чаюков И.Р. Мультимикропроцессорная система цифровой обработки сигналов // Вторая Всесоюзная конференция молодых ученых и специалистов с международным участием "Контроль, управление и автоматизация в современном производстве": Сборник докладов и сообщений. - М., 1990. - С.67.

Подписано в печать 12.11.1991 г.

Зак. № 40, тир. 100 экз.

Бумага типографская.

Печать офсетная.

ВПИ СКТБ "Модуль" , Хмельницкое шоссе , 97