

УДК 681.3.06

**В. В. Крюков, К. И. Шахгельдян**

*(Владивосток)*

### **ДВУХПРОЦЕССОРНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**

В последние годы доминирующей тенденцией при проектировании автоматизированных систем сбора данных и анализа информации стало объединение микропроцессорных средств, аппаратуры сбора данных и цифровой обработки сигналов (ЦОС), а также программного обеспечения (ПО) в единую измерительно-вычислительную систему. Приведены результаты разработки алгоритмов и программного обеспечения для измерительно-вычислительной двухпроцессорной системы, позволяющие выполнять спектральный анализ и фильтрацию с применением двух процессоров (основной процессор ПК и цифровой процессор сигналов TMS320Cxx) в режиме реального времени. Для организации работы многозадачного режима реализован механизм обмена сообщениями, которые контролируют текущее состояние работы программ. Отмечено, что для повышения эффективности работы программ на двухпроцессорной платформе необходимо учитывать производительность процессоров, решаемую вычислительную задачу и то, как программа разделяет ресурсы.

**Введение.** Проведение экспериментальных исследований связано со сложными и трудоемкими процедурами сбора данных, обработкой и анализом полученной информации. В последние годы доминирующей тенденцией при проектировании автоматизированных систем сбора данных и анализа информации стало объединение микропроцессорных средств, аппаратуры сбора данных и цифровой обработки сигналов (ЦОС), а также программного обеспечения (ПО) в единую измерительно-вычислительную систему.

На кафедре компьютерных технологий и систем Владивостокского государственного университета экономики разработана многоканальная измерительно-вычислительная двухпроцессорная система, предназначенная для ввода, хранения, обработки и анализа измерительных данных. Система содержит плату сбора данных ADC12/200 [1] и модуль цифровой обработки на основе процессора фирмы "Texas Instruments" TMS320C30. В качестве базовой вычислительной платформы выбран персональный компьютер (ПК) с процессором i80486 или "Pentium" и системной шиной стандарта ISA. Дополнительно комплекс оборудован блоком подготовки аналоговых сигналов, выполняющим усиление и полосовую фильтрацию.

Частотный диапазон аналоговых измерительных сигналов (10 Гц–80 кГц), количество параллельных информационных каналов (16) и динамический диапазон сигналов на входе (70 дБ) обуславливают технические требования к системе, которые можно рассматривать как типовые для приложе-

ний, связанных с обработкой акустических, гидрофизических, сейсмо- и виброакустических данных.

Алгоритмы обработки данных и программное обеспечение разрабатывались, исходя из следующих требований:

- регистрация информации одновременно по нескольким (до 16) каналам без потерь в отсчетах;
- оценивание свойств сигналов на этапе регистрации данных в режиме реального времени;
- исполнение программ параллельно на двух процессорах для алгоритмов фильтрации и спектрального анализа.

Перед авторами стояла задача разработать алгоритмы и программное обеспечение для измерительно-вычислительной двухпроцессорной системы, которые позволяют:

- одновременно оцифровывать аналоговые сигналы по 16 каналам;
- сохранять данные на жестком диске ПК в нескольких форматах (неупакованные данные, упакованные дельта-кодовой модуляцией с опорными точками, упакованные компандерным методом, записанные в формате звуковых файлов *wave*);
- выполнять предварительную обработку данных (сглаживание, удаление трендов, обнаружение регулярных участков, оперативная оценка доминирующих частот);
- выполнять спектральный анализ классическими и параметрическими методами оценки для одноканальных и многоканальных измерительных сигналов;
- синтезировать фильтры с конечной импульсной характеристикой и выполнять цифровую фильтрацию сигналов;
- выполнять спектральный анализ и фильтрацию с применением двух процессоров (основной процессор ПК (CPU) и цифровой процессор сигналов (DSP) TMS320Cxx) в режиме реального времени;
- выполнять некоторые специфические преобразования (вычислять матрицу корреляций, оценивать четвертые моменты случайных сигналов, определять пеленг при регистрации эхо-сигналов, оптимизировать отношение сигнал/помеха при совместной обработке данных нескольких каналов).

Для повышения эффективности обработки комплекс программ содержит модули, работающие параллельно на CPU- и ЦОС-процессоре. Вычисление спектральных характеристик и выполнение фильтрации сигнала могут проводиться в многопроцессорном режиме или только на основном процессоре.

Разработанный программный комплекс содержит три модуля, работающих в многозадачном режиме на двух процессорах: регистрация данных и текущая оценка спектра (режим реального времени), спектральный анализ с накоплением, фильтрация данных. Для организации синхронно работающих процессов использовались функции библиотек, входящих в операционную систему (ОС) Deasy [2]. ОС Deasy предназначена для разработки, отладки и выполнения программ ЦОС на процессорных модулях DSP3x НТК «Инструментальные системы», построенных на базе процессоров TMS320C3x. Deasy – однозначная операционная система реального времени. Многозадачность была реализована на основе совместного использования операционных систем MS-DOS, Windows и Deasy.

Для организации работы многозадачного режима реализован механизм обмена сообщениями, которые контролируют текущее состояние работы программ. Например, после окончания вычислений на ЦОС-процессоре не-

обходимо сообщить основному процессору о возможности получения результата и далее инициировать продолжение вычислений на процессоре ЦОС. Библиотеки системных функций позволяют генерировать и организовать обработку прерываний от одного процессора к другому. На основе этих функций был организован обмен сообщениями и данными.

Библиотека для основного процессора предназначена для управления модулем ЦОС со стороны CPU из программы пользователя, написанной на языке Си. Данная библиотека поставляется для компиляторов Borland C/C++, Microsoft C и Watcom C. Авторами была произведена ее модификация для Zortech DOS, 32-разрядной DOSX и для Windows Symantec C++ и Visual C++.

**Оцифровка и ввод данных в компьютер.** Назначение параметров и режимов аппаратуры сбора данных, оцифровка и ввод данных в ПК, вывод через ЦАП осуществляются с помощью программ-драйверов, работу которых инициирует управляющая программа по командам пользователя. Оцифровка и ввод данных проходят в одном из следующих режимов (программы работают под DOS и Windows):

- оцифровка и ввод данных в основную память ПК;
- оцифровка и запись данных на жесткий диск ПК (возможны различные форматы данных);
- оцифровка, ввод данных в основную память ПК и выделение регулярных участков сигнала с графическим представлением результатов;
- ввод данных в память ПК с одновременным вычислением спектральных характеристик и отображением сигнала и результатов обработки (обработку производит ЦОС-процессор).

Каждый режим имеет свое функциональное назначение, свои достоинства и ограничения. Например, режим ввода данных в память ПК под DOS позволяет заполнять буфер данными без потери информации, но буфер ограничен памятью DOS и реально не превосходит 80000 отсчетов. После заполнения буфера данные отображаются на экране, и в это время ввод данных не производится, что, естественно, приводит к потерям.

Запись данных на жесткий диск позволяет регистрировать реализации большой длительности без потерь в отсчетах до определенной частоты, которая зависит от многих факторов, в частности от характеристик жесткого диска и его фрагментации. Этот способ ввода не позволяет проводить текущий контроль за регистрируемыми данными, что приводит к необходимости записывать всю, иногда ненужную информацию.

Режим ввода данных с текущей оценкой спектра обеспечивает одновременный ввод, отображение и обработку данных (рис. 1). Данные заполняют буфер, доступный в Windows, а это значительно больше чем 80 К отсчетов. На ПК, имеющем емкость оперативной памяти 8 Мбайт, буфер с данными может содержать 3000 К отсчетов. Буфер заполняется циклически, и остановка происходит только по желанию пользователя. С отображением сигнала и результатов обработки ввод данных без потерь возможен только до определенной частоты дискретизации. Это максимальное значение частоты дискретизации определяется характеристиками ПК (тип процессора, емкость оперативной памяти, наличие графического ускорителя). Блок-схема программы ввода сигналов в ПК с одновременной обработкой и отображением результатов приведена на рис. 2.

**Спектральная обработка данных на двухпроцессорной вычислительной платформе.** Программа расчета спектральных характеристик

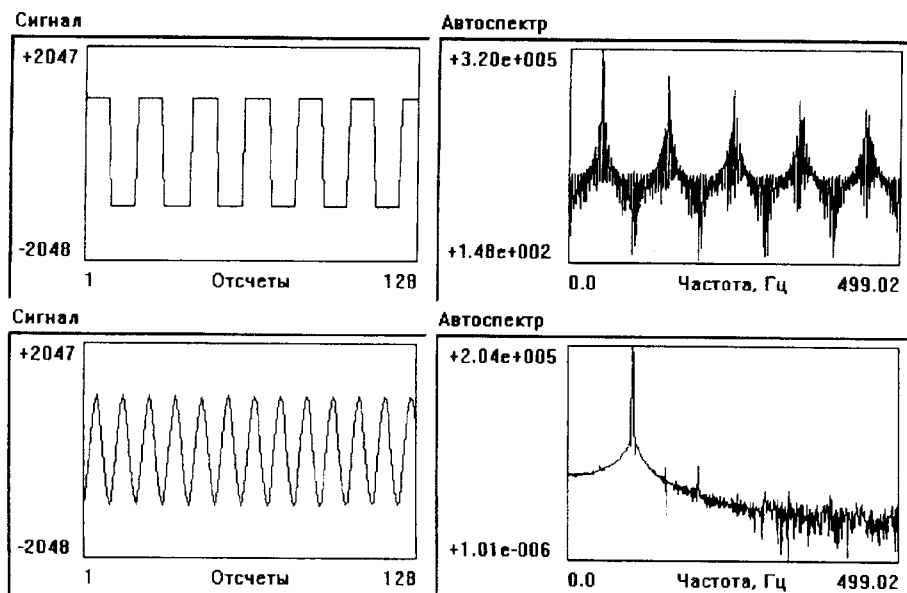


Рис. 1. Вид графической панели монитора при вводе данных в ПК с одновременной обработкой и отображением

предназначена для вычисления автоспектра, взаимного спектра и функции когерентности. Расчет может быть произведен с помощью процессора TMS320C30 или без него. В первом случае большую часть вычислительных операций выполняет ЦОС-процессор. Основной процессор ПК выполняет функции ввода данных и отображения результатов на мониторе.

Для вычисления спектральных характеристик применяется классический периодограммный метод расчета [3] (обработка другими спектральными методами осуществляется только на CPU, поскольку оперативная память на модуле ЦОС DSP3х ограничена объемом 256 Кбайт). Данный метод основан на вычислении частичной периодограммы с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ) с последующим накоплением результатов. Результаты промежуточных накоплений отображаются на мониторе в процессе вычисления.

Алгоритм оценки спектра можно разбить на три основных этапа:

- 1) выбор данных для  $i$ -го участка;
- 2) собственно расчет спектральной характеристики на  $i$ -м участке;
- 3) накопление результата и его отображение.

Очевидно, что этап 2 должен выполняться процессором ЦОС. Максимальная производительность в таком случае будет достигнута, если по временным затратам этап 2 будет равен сумме этапов 1 и 3. Для организации параллельной работы двух процессоров используется механизм передачи и обработки сообщений. Оба процессора постоянно находятся в режиме ожидания, посылки или обработки сообщения. Такие действия, как вычисления спектральной характеристики на  $i$ -м участке, могут производиться одновременно с отображением результатов накопления до  $(i-1)$ -го участка и считыванием данных  $(i+1)$ -го участка. ЦОС-процессор выполняет все основные вычислительные функции: расчет функции весового окна и энергии окна, центри-

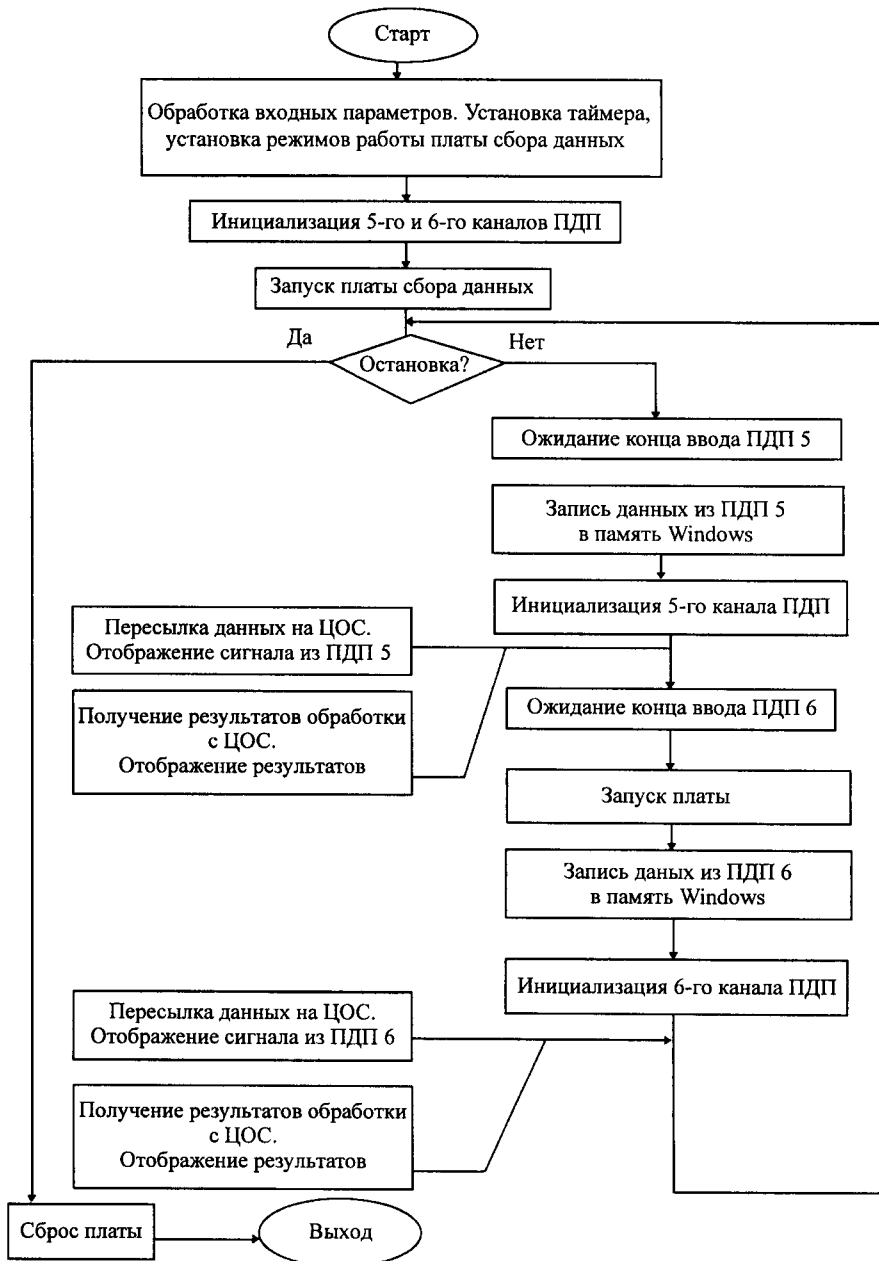


Рис. 2. Блок-схема ввода данных в ПК с одновременной обработкой и отображением

рование и взвешивание данных, а также БПФ и вычисление выборочного спектра.

Тестирование программ реального времени (или стремящихся таковыми быть) – непростая задача. Представляет интерес оценить то, насколько параллельно работают процессы. Достаточно сложно организовать работу программы так, чтобы ни один процессор не простаивал. Такая организация зависит от мощности процессоров, а именно от того, какая пара процессоров используется (i80386 + TMS320Cxx, i80486 (50 МГц) + TMS320Cxx,

i80486 (100 МГц) + TMS320Схх), какая задача решается, как программа разделяет ресурсы, и еще от очень многих параметров, например скорости доступа к жесткому диску и производительности видеосистемы. Так, программа, которая дает значительный выигрыш во времени на паре i80386 + TMS320С30, может проигрывать во времени на паре i80486 (50 МГц) + TMS320С30 по сравнению с однопроцессорным вариантом i80486 (50 МГц). Последнее обусловлено тем, что основной процессор выполняет свою часть работы значительно быстрее TMS320С30 и вынужден простаивать, ожидая результатов обработки. Очевидной рекомендацией является требование согласования производительности CPU и TMS320Схх.

Т а б л и ц а 1

Процессор	Время, с
i80386 (40 МГц)	24,8
i80386 (40 МГц) + TMS	17,8
i80486 (50 МГц)	14,1
i80486 (50 МГц) + TMS	13,2

Программа вычисления спектральных характеристик тестировалась на процессорах двух типов: i386 (40 МГц) и i486 (50 МГц). В табл. 1 приведены результаты работы программы на этих процессорах с использованием TMS320С30 и без него. Сигнал, содержащий 50 К отсчетов, считывался из файла порциями по 512 отсчетов. Процент перекрытия составлял 50 %, т. е. число выборок равнялось 199. Обработка по алгоритму расчета спектральной плотности мощности выполнялась с использованием ресурсов CPU либо TMS320С30. В процессе расчета основной процессор отображал результаты в графическом виде. Общее время выполнения программы приведено в секундах. Как видно из таблицы, для процессора i80386 (40 МГц) время оценки спектральной характеристики на двух процессорах существенно меньше, чем на основном процессоре ПК. Время вычислений на паре TMS320С30 + i80486 (50 МГц) и на i80486 почти одинаково, поскольку производительность этих двух процессоров для вычислений с плавающей точкой сравнима.

Тесты, проведенные для различной длины выборки, коэффициентов перекрытия, числа спектральных отсчетов, показали, что приведенные в таблице пропорции для времени выполнения программ при использовании TMS320С30 и без него практически сохраняются.

На рис. 3 приведен результат оценки спектра сложного сигнала.

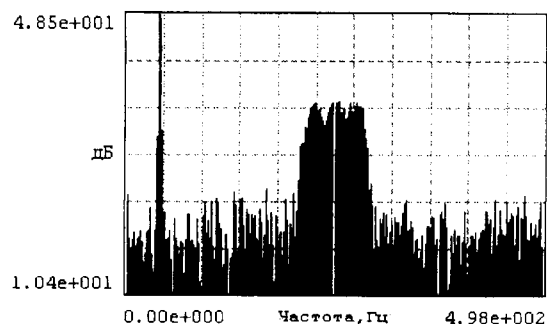


Рис. 3. Результаты оценки спектра сложного сигнала: гармоника с частотой 40 Гц, сигнал с линейной частотной модуляцией (начальная частота 200 Гц, девиация 50 Гц), белый шум (амплитудное отношение сигнал/шум равно трем)

Таблица 2

Процессор	Время	
	без отображения, с	с отображением, с
i80486 (50 МГц)	12,4	32,5
i80486 (100 МГц)	4,9	10
i80486 (50 МГц) + TMS	6,3	25
i80486 (100 МГц) + TMS	4,7	6,2

**Фильтрация сигнала на двухпроцессорной платформе.** Для программы фильтрации использован алгоритм секционированной свертки с перекрытием [4]. Подготовка данных для обработки и отображения результатов фильтрации производится основным процессором. Собственно фильтрацию (БПФ, перемножение, ОБПФ и сложение остатков) выполняет процессор ЦОС. Для обеспечения максимального распараллеливания процедур обработки необходимо, чтобы подготовка данных, сохранение и отображение результатов выполнялись во время работы процессора ЦОС.

Тестирование программы проводилось с учетом и без учета временных затрат на отображение результатов на компьютерах с процессорами i80486 (50 МГц) и i80486DX4 (100 МГц) (табл. 2).

Время приводится в секундах для 100 К отсчетов. Данные по 1 К отсчету считываются с жесткого диска, обрабатываются на основном или ЦОС-процессоре и затем записываются на жесткий диск. Из таблицы видно, что выполнение фильтрации с использованием двух процессоров (i80486 (50 МГц) + TMS) требует в 2 раза меньше времени, когда результаты фильтрации не отображаются на мониторе. Отображение результатов является длительной процедурой для компьютеров без графических ускорителей. Необходимо отметить, что из 6,3 с CPU «простаивает» около 3,3 с. Это время может быть использовано для отображения текущих результатов фильтрации. Однако на ПК с процессором i80486 (50 МГц) без графического ускорителя для отображения на графике 100 раз 1024 отсчетов в среде Windows требуется 18,7 с. Эффективность фильтрации на паре процессоров i80486 (100 МГц) и TMS320C30 существенно выше, поскольку удается согласовать время выполнения процедур обработки и отображения результатов.

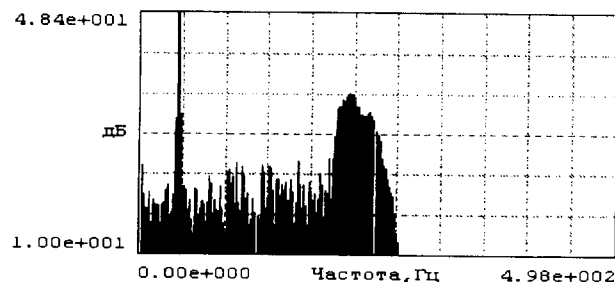


Рис. 4. Спектр сложного сигнала после низкочастотной фильтрации

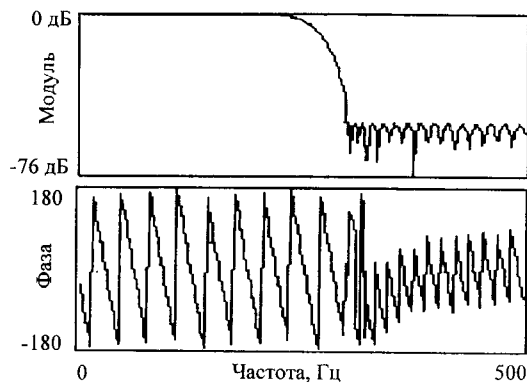


Рис. 5. Частотная характеристика фильтра нижних частот с частотой среза 300 Гц

Спектр исходного сигнала до фильтрации изображен на рис. 3. На рис. 4 приведен спектр сигнала после низкочастотной фильтрации, амплитудная и фазовая характеристики фильтра показаны на рис. 5.

**Заключение.** Процесс разработки алгоритмов и программ цифровой обработки сигналов и графического сопровождения измерений для двухпроцессорных вычислительных платформ имеет ряд особенностей. Во-первых, обработка должна осуществляться в темпе, с которым изменяются входные данные. Поэтому многие алгоритмы желательно распараллеливать для совместного использования вычислительных ресурсов основного процессора ПК и процессора ЦОС. Во-вторых, возникает проблема разделения общих ресурсов (общая память, системная шина, устройства ввода/вывода и т. д.). Проблема с низкой пропускной способностью системной шины ISA может быть решена путем использования специализированных локальных шин.

Повышение эффективности (здесь и далее речь идет о времени выполнения программ) каждого программного модуля в системе с последовательным выполнением команд всегда приводит к повышению общей эффективности ПО. Поэтому повышение эффективности ПО может производиться на стадии отладки и тестирования. Однако когда речь идет о параллельной вычислительной системе, справедлив тезис: «Система плоха настолько, насколько плохо самое слабое ее звено». Это означает, что необходимо определять самый длительный процесс, что не всегда легко сделать. Кроме того, самый быстрый процесс на одной вычислительной системе не обязательно окажется таким же на другой. Например, процесс отображения результатов обработки на мониторе ПК может быть очень длительным на компьютере без графического ускорителя и не критичным по времени на компьютере с ускорителем. Конечно, повышение эффективности отдельных программных модулей тоже имеет смысл, но разумнее сосредоточить внимание на самом критичном процессе. В разработанном программном комплексе для каждого процесса была организована своя область сообщений. Для обеспечения параллельной работы используется механизм передачи и обработки сообщений. Чтобы повысить эффективность ПО, следует организовать *очередь сообщений*, когда оба процесса посылают в очередь свое сообщение и продолжают работу, не ожидая, пока другой процессор возьмет из очереди предыдущее сообщение.



Для организации работы программ так, чтобы ни один процессор из пары CPU + TMS не простаивал, необходимо учитывать производительность процессоров, решаемую вычислительную задачу и то, как программа разделяет ресурсы. Для этого можно определить те программные модули, которые будут выполняться только на одном процессоре, например, БПФ на процессоре ЦОС, вывод на экран на CPU и т. д. Затем необходимо выделить программные модули, которые могли бы выполняться на обоих процессорах (на-

1. Модуль аналогового ввода-вывода ADC12/200: Руководство пользователя. М.: Инструментальные системы, 1993.
2. Операционная система Deasy для процессорных модулей ЦОС на базе TMS320C3x. М.: Инструментальные системы, 1994.
3. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.
4. Рабинер Л., Голд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978.

*Владивостокский университет экономики,  
E-mail: kryukov@vvsu.ru*

*Поступила в редакцию  
28 июля 1997 г.*