

THEORY AND APPLICATION  
OF  
DIGITAL SIGNAL PROCESSING

Lawrence R. Rabiner  
Bell Laboratories

Bernard Gold  
MIT Lincoln Laboratory

PRENTICE-HALL, INC ENGLEWOOD CLIFFS, NEW JERSEY  
1975

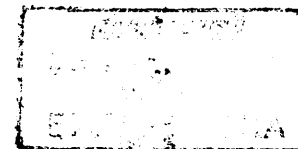
081.3  
P125

Л. РАБИНЕР, Б. ГОУЛД

ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ  
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ  
СИГНАЛОВ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО  
А. Л. ЗАЙЦЕВА, Э. Г. НАЗАРЕНКО, Н. Н. ТЕТЬКИНА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
Ю. Н. АЛЕКСАНДРОВА



444163

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
МОСКВА 1978

В монографии изложены основы теории дискретных сигналов и почти все современные методы расчета цифровых фильтров. Рассмотрены теория, способы выполнения и применения алгоритмов быстрого преобразования Фурье. Отдельные главы посвящены вопросам проектирования специализированных устройств цифровой обработки и применению цифровых методов для анализа речевых и радиолокационных сигналов. Книга содержит большое количество справочного материала, а также тексты программ для расчета типовых цифровых устройств.

Книга представляет большой практический интерес для инженеров-проектировщиков устройств первичной обработки сигналов, экспериментаторов, использующих для анализа сигналов вычислительные машины, специалистов в области вычислительной математики и программистов.

*Редакция литературы по новой технике*

Original English language edition published by  
Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey,  
U.S.A.

Copyright © 1975 by Prentice-Hall, Inc.

© Перевод на русский язык, «Мир», 1978

Р 30401—139 139—78  
041(01)—78

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Для успешного осуществления любого значительного начинания, подобного написанию данной книги, необходимы помощь и поддержка. Авторы хотели бы выразить признательность сотрудникам фирмы Bell за помощь на всех этапах подготовки этой книги. Мы хотели бы особенно поблагодарить Генри Раупа из чертежного бюро, а также г-жу Ричардс и г-жу Олпвари из машинописного бюро за их неоценимую помощь. Г-жа Беверли Масайтис также оказывала нам помощь, перепечатывая различные варианты этой книги. Г-жа Кэти Шипли помогала составлять программы, которые были использованы в этой книге. Авторы хотели бы также поблагодарить библиографический отдел фирмы Bell за содействие в подготовке рукописи.

Почти одновременно с публикацией этой книги выйдет в свет дополняющая ее книга Оппенгейма и Шафера. Данная книга предназначена в основном для инженеров-проектировщиков и может служить учебным пособием на курсах повышения квалификации, тогда как книга Оппенгейма и Шафера рассчитана на аспирантов электротехнических специальностей и посвящена в основном глубокому рассмотрению фундаментальных теоретических вопросов. В нашей же книге главное внимание уделено детальному изложению последних достижений в области цифровой обработки, включая методы расчета цифровых фильтров и специализированных устройств, а также практическому применению цифровой обработки. Аспирантам было бы наиболее целесообразно использовать эти книги в следующей последовательности: сначала в течение одного семестра проработать книгу Оппенгейма и Шафера, а затем перейти к изучению новейших методов, используя нашу книгу. Здесь следует отметить, что мы в долгу перед указанными авторами за благотворное техническое сотрудничество. В частности, один из авторов этой книги Л. Рабинер в течение семи лет тесно сотрудничал с Роном Шафером, и это содружество принесло ему глубокое удовлетворение и в профессиональном отношении было весьма плодотворным. Все мы начали работать в этой обла-

сти науки на ранней стадии ее развития и «выросли» вместе с ней. Интересно отметить, что, хотя обе эти книги написаны независимо друг от друга, часть материала в них является общей, что неизбежно для книг, которые в некоторой мере претендуют на полноту изложения. В этой связи мы выражаем глубокую признательность Оппенгейму и Шаферу за то большое влияние, которое они оказали на методику изложения теоретического материала первых глав книги; по-видимому, это влияние особенно заметно в гл. 2 при изложении теории дискретных линейных систем и в некоторых разделах гл. 5 при описании эффектов конечной разрядности арифметического устройства. Однако (и мы уверены, что наши коллеги согласятся с этим) нашей признательностью за эту помощь мы можем лишь в незначительной степени отблагодарить их за теплое и продолжительное техническое сотрудничество и, что еще более важно, за их дружбу с нами. Мы хотели бы также выразить признательность двум выдающимся специалистам в области цифровой обработки сигналов Чарльзу Рэйдеру из Линкольновской лаборатории и Джеймсу Кайзеру, сотруднику фирмы Bell, с которыми нам посчастливилось близко познакомиться. Наше техническое сотрудничество с этими специалистами было очень плодотворным. Мы благодарны Чарльзу Рэйдеру за его участие в подготовке к печати разд. 6.19, посвященного свертке и корреляции, выполняемым с помощью теоретико-числовых преобразований.

Значительная часть материала гл. 5, касающегося эффектов квантования в цифровых фильтрах, основывается на важных работах Леланда Джексона (Rockland Systems Corporation) и Клифа Вайнштейна (Линкольновская лаборатория Массачусетского технологического института). В частности, Джексон предоставил некоторые графические данные, приведенные в этой главе и гл. 9. Фотографии, использованные в разд. 7.21, были предоставлены проф. Томасом Стокхэмом из Университета штата Юта, а также проф. Леоном Хармоном и Аланом Стрельцовым из Университета Case Western Reserve.

Значительная часть материала гл. 8, посвященной специализированным устройствам для цифровой обработки сигналов, была заимствована из опубликованных работ и подготовлена с помощью коллег из Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института. Многие сведения взяты из справочников и руководств по применению интегральных схем, опубликованных фирмой Motorola. Поль Макхью, Джо Тирни, Алан Маклафлин, Питер Бланкеншип, Альберт Хантун и Чарльз Рэйдер из Линкольновской лаборатории МТИ помогли в подготовке этой главы. Кроме того, большое влияние на изложение материала по умножителям оказала работа Стилианоса Пезареса по матричным умножителям. Особую благодарность мы должны выразить Пи-

теру Бланкеншипу за разрешение использовать в этой главе его работу по делителям и арифметическим устройствам с плавающей запятой, а также за полезные замечания и подробный разбор первого варианта этой главы.

Авторы выражают признательность сотрудникам Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института Эдварду Хофштетеру, Питеру Бланкеншипу, С. Е. Муэ и Тэду Биалли за полезные советы, критические замечания и дополнения к гл. 13, посвященной применению цифровой обработки в радиолокации. В частности, Хофштетер любезно согласился просмотреть первый вариант этой главы.

Наконец, мы выражаем огромную признательность Чарльзу Рэйдеру за весьма внимательное и тщательное редактирование всей рукописи. Он не только исправил некоторые математические и логические ошибки, но внес также ряд ценных предложений, которые способствовали более полному освещению некоторых важных вопросов. Мы очень обязаны ему за эту помощь.

Необходимо выразить благодарность Джеймсу Л. Фланагану за его руководство в течение ряда лет работой одного из нас (Л. Рабинера) в фирме Bell. Его понимание проблем и трудностей, связанных с подготовкой этой книги, сделало работу под его руководством особенно приятной.

Наверное, самая глубокая благодарность и признательность должны быть выражены нашим семьям за их терпение, выдержку и понимание, которые от них потребовались в значительно большей мере, чем обычно. Поскольку эта книга была подготовлена в основном в нерабочее время, т. е. в те часы, которые обычно посвящены семье, то те два с половиной года, которые наши семьи потеряли, являются немалым вкладом в эту работу. Мы очень благодарны нашим женам и детям за их помощь

*Лоуренс Р. Рабинер и Бернард Гоулд*

# Глава 1

## ВВЕДЕНИЕ

### 1.1. Краткий исторический очерк и некоторые комментарии

Еще с середины 40-х годов, если не раньше, специалисты по радиоэлектронике начали задумываться над возможностью применения специализированных цифровых устройств для решения разнообразных задач, связанных с обработкой сигналов. Так, например, Леммель (1948) вспоминает беседу между Бодде, Шенноном и несколькими другими научными сотрудниками фирмы Bell Telephone о возможности использования цифровых элементов для создания фильтров. Нечего и говорить, что в то время выводы не были благоприятными. С точки зрения стоимости, размеров и надежности предпочтение следовало отдать аналоговой фильтрации и аналоговым методам спектрального анализа. Стокхэм (1955) сообщает, что в 50-х годах Линвиль, тогда профессор Массачусетского технологического института, обсуждал вопросы цифровой фильтрации на семинарах со своими аспирантами. К этому времени теория управления, частично основанная на работе Гуревича (1945), уже утвердилась как самостоятельное научное направление; были глубоко изучены принципы дискретизации колебаний и возникающие при этом спектральные эффекты, а математический аппарат теории  $z$ -преобразования, существовавший еще со времен Лапласа, начал находить применение в радиоэлектронике и смежных дисциплинах. Однако достигнутый уровень развития техники позволял получить практические результаты только в задачах управления медленными процессами и обработки низкочастотных сейсмических сигналов. Хотя сейсмологи при решении многих интересных задач довольно широко использовали понятия, относящиеся к цифровой фильтрации, более или менее строгая теория цифровой обработки сигналов начала создаваться лишь с середины 60-х годов. К этому времени были оценены потенциальные возможности интегральных микросхем, что позволило представить полную систему обработки сигналов, для которой наилучшая техническая реализация была бы именно цифровой.

Первый крупный вклад в теорию цифровой обработки сигналов, касающийся анализа и синтеза цифровых фильтров, был сде-

лан Кайзером (фирма Bell); он показал, как можно рассчитывать цифровые фильтры с нужными характеристиками, используя билинейное преобразование. Примерно тогда же (1965 г.) появилась статья Кули и Тьюки о быстром методе вычисления дискретного преобразования Фурье, давшая мощный толчок развитию этого нового технического направления. Позже метод был развит и стал широко известен как быстрое преобразование Фурье (БПФ) благодаря многочисленным публикациям в *IEEE Transactions of the Group on Audio and Electroacoustics* и других журналах. Ценность этого метода заключается в сокращении времени вычисления дискретного преобразования Фурье (на один-два порядка для большинства практических задач).

Опубликование статьи Кули и Тьюки ускорило развитие строгой и достаточно полной теории цифровой фильтрации. Важнейшее значение метода БПФ состояло в том, что он наглядно продемонстрировал, насколько цифровые методы при спектральном анализе могут оказаться экономичнее аналоговых. После создания метода БПФ интенсивность исследований в области цифровой фильтрации резко возросла, и в настоящее время цифровые методы широко используются для спектрального анализа самых разнообразных сигналов, начиная с низкочастотных колебаний в сейсмологии и звуковых колебаний в гидрологии и при анализе речи и кончая видеосигналами в радиолокации.

Возможно, наиболее интересным аспектом развития цифровой обработки является постоянно изменяющееся соотношение между ролями, которые играют цифровые фильтры с импульсными характеристиками конечной и бесконечной длины (называемые КИХ-фильтрами и БИХ-фильтрами соответственно). Первоначальный анализ КИХ-фильтров, проведенный Кайзером с использованием временных весовых функций (окон), показал, что с точки зрения объема вычислений БИХ-фильтры значительно эффективнее КИХ-фильтров. Однако Стокхэм в своей работе о вычислении свертки методом БПФ (или, точнее, о цифровой фильтрации с использованием КИХ-фильтров) показал, что с точки зрения объема вычислений реализация КИХ-фильтров высокого порядка может быть чрезвычайно эффективной, так что при сравнении КИХ-фильтров и БИХ-фильтров уже нельзя считать, что последние имеют явное преимущество. Этот вывод способствовал усиленному поиску эффективных методов расчета КИХ-фильтров.

Развитие этих исследований привело к тому, что во многих учебных заведениях в аспирантские, а также в студенческие программы электротехнических специальностей были включены курсы цифровой обработки сигналов.

Первой попыткой исчерпывающего изложения теории цифровой обработки сигналов была книга Гоулда и Рэйдера (1969). Эту

книгу применяли в качестве учебного пособия для аспирантов, и как руководство для инженеров, работающих в промышленности. Естественно, что книга не могла полностью удовлетворить и тех и других. Не нужно доказывать, что хорошее учебное пособие может быть составлено только на основе курса, читавшегося в течение по крайней мере нескольких лет, и подходящего набора задач. В то же время инженеры-разработчики хотели бы располагать более обширными сведениями по проектированию фильтров и более совершенными методами синтеза, чем те, которые существовали к моменту написания книги.

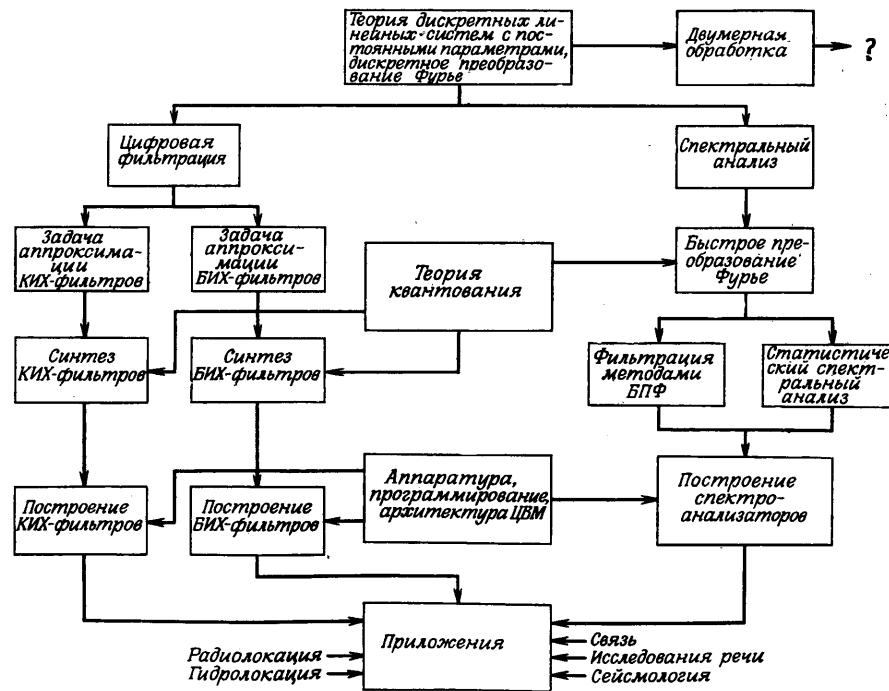
Изложив эту краткую предысторию, сформулируем назначение данной монографии. Прежде всего она адресована проектировщикам аппаратуры и программистам, т. е. специалистам, разрабатывающим системы обработки либо в виде специализированных устройств, либо на основе универсальных ЦВМ. Нам представляется, что для большей полноты изложения материала помимо теории цифровой обработки необходимо рассмотреть вопросы ее применения к анализу сигналов в радио- и гидролокации, в исследованиях речи и музыки, в сейсмологии и медицине, а также изложить основы цифровой техники, определяющей развитие рассматриваемой области и вычислительной техники в целом. Кроме того, за последнее время было разработано большое количество новых методов проектирования цифровых фильтров и теория синтеза фильтров (хотя и находящаяся, по нашему мнению, на ранней стадии своего развития) начала приобретать зримые очертания. Аналогично свойства алгоритмов БПФ исследованы весьма подробно, тогда как вопросы синтеза и проектирования цифровых спектроанализаторов в достаточной мере еще не систематизированы; проведение этой систематизации и является одной из наших задач. Просмотрев оглавление, читатель получит более подробное представление о том, как мы намереваемся достичь указанной цели.

Сделаем последнее общее замечание: в некотором смысле теорию цифровой обработки сигналов можно рассматривать как набор машинных алгоритмов, т. е. просто как один из разделов вычислительной математики. Однако теория цифровой обработки сигналов имеет, как нам представляется, много общего с классической теорией цепей и теорией преобразований (в том виде, как их преподают в вузах), и такую форму ее изложения целесообразно сохранить. Таким образом, уделив основное внимание практическим вопросам синтеза и проектирования цифровых устройств, мы постараемся сделать это не в ущерб теоретическим основам цифровой обработки.

## 1.2. Обзор основных направлений цифровой обработки сигналов

За последнее десятилетие быстро развивающиеся цифровые методы обработки сигналов были внедрены во многие разделы науки и техники и стали для них прочной теоретической базой. Фиг. 1.1 дает некоторое представление о возникновении и развитии методов цифровой обработки сигналов. Поскольку теория цифровой обработки в основном опирается на теорию дискретных линейных систем с постоянными параметрами, последняя представлена как объединяющее начало для всех направлений.

Основными направлениями использования методов цифровой обработки являются цифровая фильтрация и спектральный анализ. К цифровым фильтрам относятся КИХ-фильтры и БИХ-фильтры. Спектральный анализ можно проводить путем вычисления спектров с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) или путем вычисления спектров с применением статистических методов, например при анализе случайных сигналов (в частности, шума квантования, возникающего в цифровых системах). В предыдущем разделе уже было отмечено, что на практике при



Фиг. 1.1. Основные разделы цифровой обработки сигналов.

спектральном анализе, как правило, используются быстрое преобразование Фурье (БПФ) и основанная на нем методика вычисления быстрой свертки. Двумерная обработка сигналов является сравнительно новой областью, поэтому направление ее развития помечено на фиг. 1.1 знаком вопроса.

Другими аспектами цифровой обработки сигналов, также представленными на фиг. 1.1, являются важные проблемы построения и применения цифровых систем. Почти все теоретические положения, касающиеся проектирования цифровых фильтров и спектроанализаторов, окажутся бесполезными, если не будет ясного понимания проблем, возникающих вследствие ограниченной точности вычислений при практическом построении этих систем на основе ЦВМ или в виде специализированных устройств. Следовательно, проблемы построения систем в первую очередь связаны с математическими вопросами квантования в дискретных системах, причем в зависимости от того, как строится система — на основе ЦВМ или в виде специализированного устройства, — важно представлять себе преимущества и недостатки каждого из этих вариантов.

Читателю следует обратить внимание на то, что приложения цифровой обработки, перечисленные на фиг. 1.1, являются уже сложившимися научно-техническими направлениями, которые по традиции опираются на аналоговую технику обработки сигналов. Вопросы о целесообразности развития и применения цифровых методов обработки сигналов (при столь развитой и продолжающей совершенствоваться аналоговой технике) возникали неоднократно. Мы считаем, что ответ нужно искать в самой сущности научных и технических методов. Если формулировка технических задач зачастую бывает столь же расплывчатой, как и в гуманитарных науках (например, в антропологии, психологии и т. д.), то их решение все в большей степени становится зависимым от точности получения и воспроизводимости результатов обработки. В качестве примеров можно привести многократные уточнения значений скорости света, постоянной Планка и других универсальных физических постоянных. Большие усилия направлены на создание эталонов частоты и времени. Поэтому, хотя аналоговые системы во многих случаях могут оказаться более дешевыми, гарантированная точность и идеальная воспроизводимость результатов делают цифровые системы столь привлекательными для инженеров. Это будет в свою очередь стимулировать совершенствование технологии производства цифровых элементов, что в конечном итоге приведет к удешевлению цифровых систем. Таким образом, можно ожидать, что по своему значению цифровые способы обработки сигналов в конечном счете превзойдут аналоговые методы в силу тех же причин, по которым цифровая вычислительная техника превзошла аналоговую.

### 1.3. Построение книги

Фиг. 1.1 является хорошей иллюстрацией построения данной книги. В гл. 2 содержатся теоретические основы дискретных линейных систем. В ней мы намеревались, не вдаваясь слишком далеко в теорию, дать достаточно полный обзор главных разделов теории цифровой обработки сигналов, на которых будет основано все дальнейшее изложение. В этой главе содержится также введение в ДПФ и дается понятие быстрой свертки.

Главы 3 и 4 посвящены вопросам проектирования цифровых фильтров: в гл. 3 рассматриваются КИХ-фильтры, а в гл. 4 — БИХ-фильтры. Поскольку цифровой фильтр является одним из основных элементов большинства цифровых систем, в этих главах сделана попытка с максимальной полнотой изложить сущность различных методов расчета фильтров. В гл. 3 детально рассмотрены и сопоставлены по всем возможным параметрам методы взвешивания, частотной выборки и метод минимизации максимума ошибки аппроксимации. Известно, что фильтры с минимаксной ошибкой оптимальны согласно критерию Чебышева, причем методы их расчета (включая программы на ФОРТРАНе) неоднократно публиковались, поэтому большая часть гл. 3 посвящена обсуждению фильтров именно этого типа.

В гл. 4 рассмотрены два подхода к проектированию БИХ-фильтров. Первый (классический) подход основан на использовании подходящего преобразования для перехода от аналогового фильтра к цифровому с помощью явных выражений. К нему относятся метод отображения дифференциалов, метод инвариантного преобразования импульсной характеристики, билинейное преобразование и метод подбора нулей и полюсов. Второй подход — это прямое проектирование с использованием современных методов оптимизации для получения фильтров, оптимальных по некоторому определенному критерию. К нему относятся методы минимизации среднеквадратической ошибки и модуля ошибки, методы равновеликих пульсаций, а также способы оптимизации во временной области с целью аппроксимации заданной импульсной характеристики. Невозможно выбрать только один из методов проектирования БИХ-фильтров и утверждать, что он применим во всех практически встречающихся случаях. Ввиду этого особенно важно, чтобы читатель глубоко понял сущность различных методов проектирования БИХ-фильтров и знал все их преимущества и недостатки. Кроме того, в гл. 4 проведено сопоставление одного класса КИХ-фильтров с эквивалентными им БИХ-фильтрами. Такое сопоставление дает читателю возможность глубже проанализировать различные по сложности варианты построения фильтров, относящихся к двум сопоставляемым широким классам фильтров.

В гл. 5—7 с теоретических позиций обсуждаются квантование в цифровых фильтрах, вопросы спектрального анализа и БПФ, а также теория двумерных систем, включая методы проектирования двумерных фильтров. Эти три главы содержат главным образом теоретическую базу для изложения вопросов построения специализированных цифровых устройств и практического применения цифровой обработки, составляющих остальную часть книги.

В гл. 5 описаны эффекты квантования в цифровых системах. Введены понятия ошибки округления, шума аналого-цифрового преобразования и чувствительности характеристик фильтра к значениям его коэффициентов. Основным результатом главы являются полученные соотношения между динамическим диапазоном и шумом округления при построении рекурсивных фильтров с фиксированной запятой в прямой и каскадной форме. На основе этих соотношений разработаны методы упорядочения расположения звеньев и попарной группировки нулей и полюсов для каскадных схем фильтров, применяемые для максимизации отношения сигнал/шум на выходе фильтра. Для КИХ-фильтров описаны метод анализа эффектов, связанных с ошибкой округления, и метод масштабирования промежуточных результатов, используемый для предотвращения переполнения в фильтре. И наконец, рассмотрен вопрос о коррелированном шуме округления (или предельном цикле) в БИХ-фильтрах.

В гл. 6 в достаточно общем виде рассмотрен алгоритм БПФ — пожалуй, самый важный из алгоритмов, применяемых при цифровой обработке сигналов. Без использования сложных выкладок получены хорошо известные варианты алгоритма БПФ по основанию 2 с прореживанием по времени и по частоте. Изложена единая теория БПФ, в которой одномерное преобразование сводится к двумерному с меньшими размерами. Такой обобщенный подход позволяет проще всего объяснить смысл разрядной инверсии, поворачивающих множителей, вычислений с замещением и т. д. Вслед за БПФ в весьма общем виде описан дискретный спектральный анализ. Введены понятия скользящего и «скачущего» спектров. Показано, как спектроанализатор, работающий с использованием БПФ, можно сделать эквивалентным спектроанализатору, составленному из набора полосовых фильтров. В заключение введены количественные характеристики для спектрального анализа случайных процессов и рассмотрено несколько методов такого статистического спектрального анализа. Завершается глава обсуждением использования методов теории чисел для вычисления свертки.

Глава 7 является введением в теорию двумерных дискретных линейных систем и содержит также описание методов проектирования двумерных цифровых фильтров. Большая часть теории двумерных систем аналогична приведенной в гл. 2 теории одномерных систем. Однако некоторые важные положения, справедли-

ливые для одномерных систем, для двумерного случая непригодны; в данной главе эти положения отмечены. Хотя методы проектирования двумерных фильтров разработаны еще весьма слабо, в этой главе описывается довольно эффективный метод отображения одномерных КИХ-фильтров в двумерные и утверждается, что он является наилучшим из существующих способов проектирования двумерных фильтров.

Следующая группа глав (8—11) посвящена применению специализированных цифровых устройств для решения задач цифровой обработки сигналов. Глава 8 служит введением в цифровую технику; в гл. 9 рассматривается применение цифровых элементов для построения цифровых фильтров и специализированных цифровых устройств; в гл. 10 описаны специализированные устройства для выполнения БПФ; в гл. 11 рассмотрены программируемые вычислительные машины, предназначенные для обработки сигналов.

В гл. 7 приведены сведения, необходимые для построения специализированных устройств, реализующих любой алгоритм обработки. Введены понятия запоминающего и арифметического устройств, а также устройства управления, которые рассматриваются как основные составные части любой цифровой системы. Описаны различные схемы построения запоминающего и арифметического устройств. Проанализированы (с точки зрения быстродействия, сложности и стоимости) различные схемы сумматоров, вычитателей и умножителей.

В гл. 9 подробно описано, каким образом специализированные цифровые устройства могут быть использованы для создания универсальных фильтров, а также специализированных цифровых устройств (например, генераторов цифровых сигналов). Рассмотрены схемы построения фильтров с конечными и бесконечными импульсными характеристиками, а затем описано несколько систем, в которых цифровой фильтр используется как составная часть. К ним относятся применяемые в телефонии приемник клавишно-тонального вызова и цифровой преобразователь временно́го разделения каналов в частотное. Рассмотрена идея мультиплексирования, т. е. применения одного арифметического устройства в нескольких цифровых системах в режиме разделения времени, позволяющая снизить стоимость оборудования за счет использования дорогостоящей аппаратуры. В этой же главе приведены примеры построения цифровых устройств для генерации синусоидальных и случайных сигналов.

В гл. 10 подробно рассмотрено, каким образом применение специализированного устройства позволяет на несколько порядков ускорить выполнение алгоритма БПФ по сравнению с использованием универсальной ЦВМ. В качестве способов повышения общего быстродействия системы рассмотрены параллельное выпол-

нение арифметических операций, перекрытие во времени обращений к памяти и работы арифметического устройства, поточная обработка и т. д.

Гл. 11 посвящена применению цифровой техники для создания быстродействующих программируемых вычислительных машин, предназначенных специально для обработки сигналов. В ней описан быстродействующий цифровой процессор (FDP), разработанный и собранный в Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института. Детально рассмотрены структура такого быстродействующего процессора и методы его программирования, позволяющие оптимально использовать возможности подобных вычислительных машин. В эту же главу включено краткое описание универсального вычислительного оборудования, предназначенного для обработки сигналов.

Гл. 12 и 13 содержат примеры того, как положения, рассмотренные в книге, нашли применение при обработке речевых и радиолокационных сигналов. Идеи, представленные в последних двух главах, служат лишь иллюстрацией типичного применения теории цифровой обработки и ни в коей мере не дают полного представления о всех возможных (или хотя бы лучших) подходах к решению указанного круга задач. Нам представляется, что описанный в этих главах инженерный подход к решению задач обработки радиолокационных и речевых сигналов может послужить стимулом для разработок более эффективных и совершенных алгоритмов обработки сигналов в других областях науки и техники.

А в целом мы постарались изложить широкий круг новых идей в области цифровой обработки сигналов, которые будут представлять интерес для аспирантов и инженеров-проектировщиков.

