А. Антонью. Цифровые фильтры: анализ и проектирование

Перевод с английского

В. А. Лексаченко, В. Г. Челпанова

под редакцией С. А. Понырко

МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ»

1983

Излагаются методы цифровой фильтрации и практические рекомендации по построению цифровых фильтров в виде алгоритмов для универсальных ЭВМ и специализированных вычислительных устройств, различные методы анализа фильтров и основные способы аппроксимации, используемые для синтеза цифровых фильтров. Отдельная глава посвящена волновым фильтрам — новейшему виду цифровых фильтров, обладающему рядом достоинств.

Для инженерно-технических работников, специализирующихся в области проектирования цифровых устройств. Может быть полезна студентам старших курсов.

Антонью А. **Цифровые фильтры: анализ и проектирование**: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1983. — 320 с, ил.

Содержание книги
Цифровые фильтры: анализ и проектирование

Предисловие к русскому изданию
Предисловие
Введение

1. **Элементарный анализ**
1.1. Введение (11). 1.2. Типы дискретных сигналов (II). 1.3. Цифровой фильтр как система (12). 1.4. Математическое описание цифровых фильтров (15). 1.5. Схемы цифровых фильтров (15). 1.6. Введение в анализ во временной области (18). 1.7. Дискретная свертка (21). 1.8. Устойчивость (22). 1.9. Анализ в пространстве состояний (23). Задачи (26).

2. **Z-преобразование**
2.1. Введение (31). 2.2. Определение (31). 2.3. Теоремы (32). 2.4. Одностороннее z-преобразование (34). 2.5. Обратное z-преобразоваиие (35). 2.6. Комплексная свертка (39). Задачи (40).

3. **Применение z-преобразования**

3.1. Введение (41). 3.2. Дискретная передаточная функция (42). 3.3. Устойчивость (44). 3.4. Анализ во временной области (46). 3.5. Частотный анализ (47). Задачи (51).

4. **Реализация**
4.1. Введение (54). 4.2. Прямая форма (54). 4.3. Прямая каноническая форма (57). 4.4. Каскадная форма (58). 4.5. Параллельная форма (58). 4.6. Лестничная форма (59). 4.7. Топологические свойства (62). Задачи (68).

5. **Аппроксимация аналоговых фильтров**
5.1. Введение (71). 5.2. Основные понятия (71). 5.3. Аппроксимация Баттерворта (74). 5.4. Чебышевская аппроксимация (75). 5.5. Эллиптическая аппроксимация (79). 5.6. Бесселевская аппроксимация (89). 5.7. Преобразования (90). Задачи (92).

6. **Аналоговые, импульсные и дискретные сигналы**
6.1. Введение (94). 6.2. Преобразование Фурье (95). 6.3. Обобщенные функции (98). 6.4. Импульсные сигналы (103). 6.5. Теорема отсчетов (105). 6.6. Взаимосвязи между аналоговыми, импульсными и дискретными сигналами (107). 6.7. Обработка аналоговых сигналов (107). Задачи (112).

7. **Аппроксимации для рекурсивных фильтров**
7.1. Введение (114). 7.2. Ограничения, связанные с реализуемостью (115). 7.3. Метод инвариантности импульсной характеристики (115). 7.4. Модифицированный метод инвариантности импульсной характеристики (118). 7.5. Метод согласованного г-преобразования (121). 7.6. Метод билинейного преобразования (123). 7.7. Преобразования цифровых фильтров (128). Задачи (132).

8. **Рекурсивные фильтры, удовлетворяющие заданным требованиям**
8.1. Введение (135). 8.2. Методика расчета (136). 8.3. Расчетные формулы (137). 8.4. Расчет по формулам и таблицам (143). 8.5. Выравнивание временной задержки (147). Задачи (148).

9. **Расчет нерекурсивных фильтров**
9.1. Введение (149). 9.2. Свойства нерекурсивных фильтров (150). 9.3. Расчет с использованием рядов Фурье (154). 9.4. Использование функций окна (156). 9.5. Расчет на основе формул численного анализа (168). 9.6. Сравнение методов расчета рекурсивных и нерекурсивных фильтров (171). Задачи (172).

10. **Случайные сигналы**
10.1. Введение (175). 10.2. Случайные величины (175). 10.3. Случайные процессы (178). 10.4. Статистики первого и второго порядка (179). 10.5. Моменты и автокорреляционная функция (181). 10.6. Стационарные процессы (181). 10.7. Частотное представление (182). 10.8. Дискретные случайные процессы (184). 10.9. Фильтрация дискретных случайных сигналов (185). Задачи (187).

11. **Эффекты конечной разрядности чисел в цифровых фильтрах**
11.1. Введение (188). 11.2. Представление чисел (189). 11.3. Квантование коэффициентов (197). 11.4. Квантование произведений (201). 11.5. Масштабирование сигнала (203). 11.6. Эффект мертвой зоны (207). Задачи (213).

12. **Волновые цифровые фильтры**
12.1. Введение (215). 12.2. Чувствительность (216). 12.3. Волновое описание цепей (217). 12.4. Реализация элементов (218). 12.5. Реализация цифрового фильтра (222). 12.6. Волновые цифровые фильтры, удовлетворяющие заданным требованиям (224). 12.7. Уменьшение числа цифровых элементов (226). 12.8. Частотный анализ (229). 12.9. Другой подход к синтезу волновых цифровых фильтров (231). 12.10. Синтез каскадов фильтра, основанный на волновом описании (232). 12.11. Выбор структуры (238). Задачи (240).

13. **Дискретное преобразование Фурье**
13.1. Введение (243). 13.2. Определение (243). 13.3. Обратное ДПФ (244). 13.4. Свойства (244). 13.5. Взаимосвязь между ДПФ и z-преобразованием (246). 13.6. Взаимосвязь между ДПФ и НПФ (249). 13.7. Взаимосвязь между ДПФ и рядами Фурье (251). 13.8. Нерекурсивные аппроксимации фильтров с помощью ДПФ (252). 13.9. Упрощенные обозначения (256). 13.10. Периодические свертки (256). 13.11. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье (257). 13.12. Программная реализация цифрового фильтра (264). Задачи (267).

14. **Аппаратурная реализация**
14.1. Введение (270). 14.2. Булева алгебра (270). 14.3. Комбинационные устройства (273). 14.4. Триггеры, регистры и счетчики (280). 14.5. Последовательностные устройства (283). 14.6. Серии интегральных схем (289). 14.7. Построение цифровых фильтров (291). 14.8. Применения цифровых фильтров (299). Задачи (299).

Приложение. Эллиптические функции
П.1. Введение (302). П.2. Эллиптический интеграл первого рода (302). П.3. Эллиптические функции (304). П.4. Мнимый аргумент (305). П.5. Формулы (306). П.6. Периодичность (306). П.7. Преобразование (307). П.8. Представление эллиптических функций рядами (309).

Список литературы, переведенной на русский язык
Список литературы

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Предлагаемая советскому читателю книга представляет собой краткое, но достаточно полное изложение методов цифровой фильтрации и практических рекомендаций по построению цифровых фильтров как в виде алгоритмов для универсальных ЭВМ, так и в виде специализированных вычислительных устройств.

Теория цифровой фильтрации является вполне сформировавшейся научной дисциплиной. На русском языке уже издано несколько книг по данному вопросу. Хотя все они в значительной степени дублируют друг друга, что будет наблюдаться и в дальнейшем, каждая новая книга представляет собой определенный шаг вперед с точки зрения расширения области применения цифровой фильтрации или углубления разработки специфических проблем этой теории, или методики изложения традиционных разделов. В этом отношении данная книга также содержит ряд новых элементов, которые несомненно заинтересуют как инженеров разработчиков систем цифровой фильтрации сигналов, так и преподавателей и студентов, изучающих теорию и практику проектирования цифровых фильтров.

Прежде всего следует отметить принятую автором методику изложения, при которой каждое общее положение подкрепляется примером. Именно в этом состоит основное достоинство книги, так как читатель, заинтересованный в практической стороне дела, может быстро усвоить теоретические положения и применить их к решению поставленной перед ним конкретной задачи.

Другой особенностью книги является глава, посвященная волновым фильтрам — новому направлению в цифровой фильтрации, имеющему хорошие практические перспективы. Такой материал впервые публикуется в книге и представляет несомненный интерес для инженеров и научных работников.

Книга написана на математическом уровне, вполне доступном для инженеров и студентов старших курсов электротехнических специальностей. Именно этой категории читателей она может принести наибольшую пользу. Студенты могут пользоваться ею как учебным пособием по курсам, связанным с цифровой обработкой сигналов, или по другим, близким по содержанию учебным дисциплинам. Для инженеров эта книга — полезный справочник и руководство по основным методам цифровой фильтрации.

Предисловие автора, гл. 4, 7—9, 11, 12, 14 переведены канд. техн. наук В. Г, Челпановым; введение, гл. 1—3, 5, 6, 10, 13 и приложение — канд. техн. наук В. А. Лексаченко.

Проф. С, А. Понырко

ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге предпринимается попытка объединить теорию, методы и процедуры, которые можно применять для анализа, расчета и построения цифровых фильтров. Цифровой фильтр рассматривается как система, которая может быть выполнена в виде специализированного вычислительного устройства или программы для ЭВМ. Другими словами; рассматриваются вопросы как разработки алгоритмов (или программ для ЭВМ), которые могут использоваться для фильтрации предварительно записанных сигналов, так и проектирования специализированной цифровой аппаратуры для выполнения задач фильтрации в реальном масштабе времени подобно тому, как это делается в системах связи.

Для чтения книги достаточно знаний по дифференциальному и интегральному исчислению, теории функций комплексной переменной и простейшим дифференциальным уравнениям в объеме вузовского курса математики, а также основ теории эллиптических функций (§ 5.5). Поскольку последняя тема обычно не включается в программу, в приложении даются краткие, но достаточно полные сведения об этих функциях. Основные понятия, связанные со случайными величинами и процессами, рассматриваются в гл. 10.

В гл. 1 вводится понятие цифрового фильтра как дискретной системы, которая может быть линейной или нелинейной, физически реализуемой или нереализуемой и т. д. Затем на элементарном уровне проводится анализ такой системы во временной области, осуществляемый на примере решения разностного уравнения методом индукции. Хотя этот метод едва ли применим на практике, он имеет методическое значение, так как дает глубокое понимание сущности цифрового фильтра. Глава завершается другим, более совершенным методом временного анализа, базирующимся на характеристиках

пространства состояний.

Основной математический аппарат для анализа цифровых фильтров — z-преобразование — описывается в гл. 2. В гл. 3 рассматриваются применения z-преобразования для анализа линейных стационарных фильтров во временной и частотной областях.

Реализация цифровых фильтров, под которой понимается процесс перехода от передаточной функции к схеме, обсуждается в гл. 4. Далее в этой главе приводится полезная топологическая теорема, известная под названием теоремы Теледжена. Она используется затем для введения понятий взаимности, взаимообратимости и транспозиции. Глава заканчивается рассмотрением удобного метода, анализа чувствительности цепи, основанного на теореме Теледжена.

Аппроксимация 'передаточных функций рекурсивных цифровых фильтров почти всегда получаются косвенными методами из аппроксимаций передаточных функций аналоговых фильтров (например, чебышевской, эллиптической и т. д.). Такие аппроксимации рассматриваются в гл. 5. Более подробно анализируется эллиптическая аппроксимация, поскольку она наиболее эффективна. Хотя вывод этой аппроксимации довольно сложен, в конце § 5.5 приведены удобные расчетные формулы.

В гл. 1—5 цифровой фильтр рассматривается как самостоятельное устройство с характерными для него методами анализа. В гл. 6 устанавливается теоретическая связь между дискретными и аналоговыми сигналами, которая приводит к прямой связи между z-преобразованием и преобразованием Фурье. На этом основании многие методы расчета аналоговых фильтров могут быть применены для анализа и расчета цифровых фильтров.

Глава 7 посвящается проблеме аппроксимации передаточной функции рекурсивных фильтров. В ней описываются некоторые методы, с помощью которых заданная аналоговая передаточная функция может быть преобразована в соответствующую дискретную (например, методы инвариантности импульсной характеристики и билинейного преобразования). В гл. 8 приводится процедура, применяемая для расчета фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптических, удовлетворяющих заданным требованиям.

Нерекурсивным фильтрам и их аппроксимации посвящается гл. 9. Подробно описывается использование функций окна. Обращается внимание на функцию окна Кайзера, которая обладает большой универсальностью. В гл. 10 вводится понятие случайного процесса для представления случайных сигналов. Такие сигналы возникают в цифровых фильтрах из-за неизбежного квантования сигналов. Эффекты конечной разрядности представления чисел в цифровых фильтрах и соответствующие современные методы их анализа обсуждаются в гл. 11. В рассматриваемые темы включены квантование коэффициентов и произведений, масштабирование и границы предельного цикла.

Сравнительно новым направлением в области цифровой фильтрации являются волновые цифровые фильтры, описываемые в гл. 12. Они могут обладать определенными привлекательными свойствами, например низкой чувствительностью. Приводятся поэтапные процедуры, с помощью которых могут быть рассчитаны фильтры, удовлетворяющие заданным требованиям, а также перечень рекомендаций, которые могут быть использованы при выборе схемы '(или структуры) цифрового фильтра.

В гл. 13 приводятся дискретное преобразование Фурье и связанный с ним метод быстрого преобразования Фурье, используемый как математическое средство программного построения цифровых фильтров. Много внимания уделяется изложению соотношений между дискретным преобразованием Фурье и 1) z-преобразованием, 2) непрерывным преобразованием Фурье и 3) рядами Фурье, так как без ясного представления об этих соотношениях применение метода быстрого преобразования Фурье может привести лишь к получению массы бессмысленных чисел.

Заключительная гл. 14 посвящается технической реализации цифровых фильтров. Она начинается с краткого обзора булевой алгебры, затем детально описываются различные типы комбинационных и последовательностных цепей, которые могут использоваться в качестве компонентов цифрового фильтра. Далее дается описание основных серий интегральных схем и сравниваются их параметры. В § 14.7 излагаются три специфических подхода к выполнению цифрового фильтра и обсуждаются их достоинства и недостатки. Глава завершается кратким рассмотрением тенденций в области цифровой фильтрации в прошлом, настоящем и будущем.

Большинство методов иллюстрируется примерами и специально подобранными задачами.

Книга может служить учебником для двухсеместрового курса по цифровым фильтрам после завершения программы обучения на младших курсах или в течение первого года обучения на старших курсах. Материал книги может использоваться также для односеместрового курса студентами, получившими соответствующую подготовку по основам теории дискретных систем, аналоговым фильтрам, преобразованию Фурье, теории случайных величин и процессов. Такой курс может содержать: 1) обзор гл. 6; 2) краткое обсуждение аппроксимаций аналоговых фильтров (гл. 5) с акцентом на приложения; 3) главы с 7 по 9; 4) главу 11, возможно, совместно с § 4.7; 5) избранный материал из гл. 12—14 в зависимости от требуемой специализации.

Книга, будет интересна также разработчикам фильтров и научным работникам, которые занимаются обработкой дискретных сигналов.

Я хочу поблагодарить В. Бхаргава, А. Константинидиса, Р. Крошье, Л. Джексона, О. Моикевича, А. Папулиса, В. Сэрага и Л. Вейнберга, прочитавших отдельные части рукописи и высказавших ряд ценных замечаний; С. Дайректора, Р. Филиповски и С. Митра за внимательный просмотр рукописи и внесенные предложения; Дж. Калахана и М. Н. Своми за поддержку этой работы; г-жу Дж. Андерсон за перепечатку рукописи; Конкордский университет и Национальный научно-исследовательский совет Канады за поддержку исследований, в ходе которых было получено много новых результатов, представленных в книге. Наконец, но не в последнюю очередь, я хочу поблагодарить мою жену Розмари, а также Энтони, Дэвида, Константина и Элен за их терпение и понимание.

Андреас Антонью

Скачать книгу Цифровые фильтры: анализ и проектирование. Москва, Издательство Радио и связь, 1983