

Л.РАБИНЕР, Б.ГОУЛД

# ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ (THEORY AND APPLICATION OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
<b>Глава 1. Введение</b>	<b>9</b>
1.1. Краткий исторический очерк и некоторые комментарии	9
1.2. Обзор основных направлений цифровой обработки сигналов	12
1.3. Построение книги	14
<b>Глава 2. Теория дискретных линейных систем</b>	<b>18</b>
2.1. Введение	18
2.2. Последовательности	18
2.3. Представление произвольных последовательностей	22
2.4. Линейные системы с постоянными параметрами	22
2.5. Физическая реализуемость. Устойчивость	25
2.6. Разностные уравнения	26
2.7. Частотная характеристика	30
2.8. Частотная характеристика систем первого порядка	32
2.9. Частотная характеристика систем второго порядка	33
2.10. Дискретный ряд Фурье	35
2.11. Замечания о единицах измерения частоты	36
2.12. Соотношение между непрерывными и дискретными системами	36
2.13. z-преобразование	39
2.14. Соотношение между z-преобразованием и Фурье-преобразованием последовательности	41
2.15. Обратное z-преобразование	43
2.16. Свойства z-преобразования	44
2.17. Решение разностных уравнений с применением одностороннего z-преобразования	49
2.18. Геометрическая интерпретация преобразования Фурье	50
2.19. Построение цифровых фильтров (структурные схемы фильтров)	52
2.20. Структурные схемы фильтров без полюсов	58
2.21. Дискретное преобразование Фурье	62
2.22. Свойства ДПФ	70
2.23. Свертка последовательностей	72
2.24. Линейная свертка конечных последовательностей	74
2.25. Секционированные свертки	76
2.26. Дискретное преобразование Гильберта	81
2.27. Преобразование Гильберта действительных сигналов	84
Литература	87
<b>Глава 3. Теория и расчет цифровых фильтров с импульсными характеристиками конечной длины</b>	<b>89</b>
3.1. Введение	89
3.2. Порядок расчета фильтров	89
3.3. Свойства КИХ-фильтров	90
3.4. Характеристики КИХ-фильтров с линейной фазовой характеристикой	91
3.5. Частотная характеристика КИХ-фильтров с линейной фазой	95
3.6. Расположение нулей КИХ-фильтров с линейной фазой	99
3.7. Методы расчета КИХ-фильтров с линейными фазами	103
3.8. Первый метод расчета — метод взвешивания	103
3.9. Прямоугольное окно	106
3.10. «Обобщенное» окно Хэмминга	107
3.11. Окно Кайзера	109
3.12. Примеры фильтров нижних частот с различными окнами	110
3.13. Особенности использования метода взвешивания	117

3.14. Несколько практических приемов использования окон	119
3.15. Дополнительные примеры фильтров, рассчитанных методом взвешивания	122
3.16. Общая характеристика окон	124
3.17. Второй метод проектирования — метод частотной выборки	124
3.18. Решение задачи оптимизации	127
3.19. Линейное программирование	129
3.20. Фильтры с частотной выборкой вида 1 и 2	131
3.21. Фильтры вида 1 с частотной выборкой и линейной фазой	132
3.22. Фильтры вида 2 с частотной выборкой и линейной фазой	134
3.23. Некоторые самые общие результаты расчета фильтров методом частотной выборки	136
3.24. Заключение к описанию метода частотной выборки	144
3.25. Третий метод проектирования — проектирование оптимальных фильтров с минимаксной ошибкой	144
3.26. Аппроксимация по Чебышеву со взвешиванием	145
3.27. Ограничение на число экстремумов частотной характеристики фильтра с линейной фазой	148
3.28. Решение нелинейных уравнений для КИХ-фильтров с максимумом пульсаций	151
3.29. Расчет КИХ-фильтров с максимумом пульсаций на основе полиномиальной интерполяции	153
3.30. Использование алгоритма замены Ремеза для расчета оптимальных фильтров	157
3.31. Расчет оптимальных КИХ-фильтров методами линейного программирования	162
3.32. Характеристики оптимальных фильтров нижних частот вида 1	163
3.33. Некоторые дополнительные свойства оптимальных фильтров нижних частот вида 1	171
3.34. Соотношения между параметрами оптимального фильтра нижних частот	178
3.35. Свойства оптимальных фильтров нижних частот вида 2	180
3.36. Характеристики оптимальных дифференциаторов	187
3.37. Характеристики оптимальных преобразователей Гильберта	193
3.38. Многополосные оптимальные КИХ-фильтры	201
3.39. Расчет фильтров при одновременном ограничении и во временной, и в частотной областях	204
3.40. Непосредственное сравнение различных КИХ-фильтров нижних частот	207
Литература	208
Приложение	210
<b>Глава 4. Теория и аппроксимация цифровых фильтров с бесконечными импульсными характеристиками</b>	<b>228</b>
4.1. Введение	228
4.2. Элементарные свойства БИХ-фильтров: квадрат амплитудной характеристики, фазовая характеристика, характеристика групповой задержки	232
4.3. Методы расчета коэффициентов БИХ-фильтра	234
4.4. Расчет цифровых фильтров по фильтрам непрерывного времени	235
4.5. Метод отображения дифференциалов	236
4.6. Метод инвариантного преобразования импульсной характеристики	240
4.7. Билинейное z-преобразование	244
4.8. Согласованное z-преобразование	249
4.9. Обзор методов расчета аналоговых фильтров нижних частот	252
4.10. Расчетные диаграммы фильтров нижних частот	265
4.11. Сравнение методов инвариантного преобразования импульсной характеристики и билинейного преобразования для эллиптических фильтров	279
4.12. Частотные преобразования	285
4.13. Прямые методы расчета цифровых фильтров	292
4.14. Применение методов оптимизации для расчета БИХ-фильтров	297
4.15. Обзор методов расчета БИХ-фильтров	314
4.16. Сравнение КИХ- и БИХ-фильтров	315
4.17. Сравнение оптимальных КИХ-фильтров и эллиптических фильтров с выравниванием групповой задержки	319
Литература	325
<b>Глава 5. Эффекты конечной разрядности чисел в цифровых фильтрах</b>	<b>327</b>
5.1. Введение	327
5.2. Аналого-цифровое преобразование	328
5.3. Цифро-аналоговое преобразование	333
5.4. Системы счисления, применяемые в цифровых устройствах	335

5.5. Система счисления с фиксированной запятой	335
5.6. Системы счисления с плавающей запятой	336
5.7. Система счисления с поблочно плавающей запятой	338
5.8. Виды квантования в цифровых фильтрах	339
5.9. Усечение	340
5.10. Округление	341
5.11. Шум округления в рекурсивных структурах с фиксированной запятой	342
5.12. Ограничение динамического диапазона в системах с фиксированной запятой	349
5.13. Ограничение динамического диапазона при построении фильтров в прямой форме	355
5.14. Ограничение динамического диапазона при построении фильтров в параллельной форме	356
5.15. Ограничение динамического диапазона при построении фильтров в каскадной форме	357
5.16. Упорядочение размещения блоков и попарный подбор нулей и полюсов блоков при построении фильтра в каскадной форме	358
5.17. Выводы относительно взаимосвязи между динамическим диапазоном и уровнем шума округления	360
5.18. Дополнительные замечания о взаимосвязи между динамическим диапазоном и уровнем шума округления	361
5.19. Шум округления в нерекурсивных структурах с фиксированной запятой	363
5.20. Шум округления при построении нерекурсивных фильтров в прямой форме	364
5.21. Шум округления при построении нерекурсивных фильтров в каскадной форме	366
5.22. Шум округления в рекурсивных структурах с плавающей запятой	370
5.23. Квантование коэффициентов	372
5.24. Квантование коэффициентов в рекурсивных структурах	373
5.25. Квантование коэффициентов при построении фильтров в прямой форме	374
5.26. Экспериментальная проверка шумовой модели квантования коэффициентов	377
5.27. Оптимальное квантование коэффициентов	378
5.28. Квантование коэффициентов в двухполосном фильтре	382
5.29. Квантование коэффициентов в нерекурсивных структурах	384
5.30. Квантование коэффициентов при построении КИХ-фильтров в прямой форме	384
5.31. Квантование коэффициентов при построении КИХ-фильтров в каскадной форме	387
5.32. Колебания предельного цикла	388
Литература	392
<b>Глава 6. Спектральный анализ и быстрое преобразование Фурье</b>	<b>394</b>
6.1. Введение	394
6.2. Введение в алгоритмы БПФ с основанием 2	395
6.3. Некоторые свойства алгоритма БПФ с основанием 2 и прореживанием по времени	400
6.4. Перестановка данных и двоичная инверсия	402
6.5. Программа расчета БПФ на ФОРТРАНе	405
6.6. Алгоритм БПФ с прореживанием по частоте	407
6.7. Вычисление обратного ДПФ с помощью алгоритма прямого ДПФ	410
6.8. Единый подход к алгоритмам БПФ	411
6.9. Алгоритмы БПФ с основанием 2	419
6.10. Спектральный анализ в одной точке z-плоскости	421
6.11. Спектральный анализ с применением БПФ	423
6.12. Некоторые характеристики спектрального анализа	424
6.13. Соотношение между «скачущим» БПФ и гребенкой фильтров	427
6.14. Использование окон при спектральном анализе	429
6.15. Измерение спектра в ограниченном секторе z-плоскости с использованием БПФ	432
6.16. Алгоритм Блустейна	433
6.17. Алгоритм z-преобразования с использованием ЛЧМ-фильтрации	435
6.18. Энергетический спектр случайных сигналов	441
6.19. Свертка и корреляция с использованием теоретико-числовых преобразований	463
Литература	480
Приложение. Условные обозначения для БПФ	481
<b>Глава 7. Введение в теорию двумерной обработки сигналов</b>	<b>484</b>
7.1. Введение	484
7.2. Двумерные сигналы	484

7.3. Двумерные системы	486
7.4. Физическая реализуемость. Разделимость. Устойчивость	487
7.5. Двумерные разностные уравнения	488
7.6. Частотные методы	489
7.7. Двумерное z-преобразование	492
7.8. Конечные последовательности	493
7.9. Свертка последовательностей	494
7.10. Двумерное ДПФ	495
7.11. Расчет двумерных фильтров	496
7.12. БИХ-фильтры	497
7.13. Устойчивость БИХ-фильтров	498
7.14. КИХ-фильтры	502
7.15. Двумерные весовые функции (окна)	503
7.16. Пример расчета фильтра нижних частот методом взвешивания	505
7.17. Фильтры с частотной выборкой	510
7.18. Двумерные фильтры нижних частот с частотной выборкой	516
7.19. Расчет оптимальных (в минимаксном смысле) двумерных фильтров	519
7.20. Частотное преобразование одномерных фильтров в двумерные	522
7.21. Примеры обработки изображений	530
Литература	532
<b>Глава 8. Введение в цифровую технику</b>	<b>534</b>
8.1. Введение	534
8.2. Некоторые вопросы проектирования аппаратуры цифровой обработки сигналов	535
8.3. Булева алгебра. Примеры простых логических цепей	541
8.4. Основные типы интегральных логических схем	546
8.5. Серийные логические ИС: вентили, коммутаторы и дешифраторы, триггеры, арифметические и запоминающие устройства	556
8.6. Умножители	568
8.7. Делители и устройства с плавающей запятой	580
8.8. Пример: проектирование быстродействующего матричного умножителя	590
8.9. Заключение	596
Литература	596
<b>Глава 9. Специализированные устройства для цифровой фильтрации и генерации сигналов</b>	<b>597</b>
9.1. Введение	597
9.2. Аппаратурное построение КИХ-фильтра прямой формы	597
9.3. Параллелизм при построении КИХ-фильтров прямой формы	600
9.4. Каскадная форма КИХ-фильтра	602
9.5. Прямая форма КИХ-фильтра с высоким уровнем параллелизма	606
9.6. Прямая форма построения БИХ-фильтров	609
9.7. Каскадная форма БИХ-фильтров	610
9.8. Мультиплексирование	611
9.9. Цифровой приемник клавишно-тонального вызова	615
9.10. Цифровой преобразователь временного разделения каналов в частотное разделение каналов	617
9.11. Расчленение цифровых фильтров на составные части при построении их на интегральных микросхемах	620
9.12. Специализированный цифровой синтезатор частот	621
9.13. Методы генерации псевдослучайных чисел	626
9.14. Методы генерации гауссовых случайных чисел	629
Литература	631
<b>Глава 10. Специализированные устройства для выполнения БПФ</b>	<b>633</b>
10.1. Введение	633
10.2. Обзор теоретических основ БПФ	633
10.3. Нумерация при БПФ. Двоичная инверсия и разрядная инверсия для алгоритмов БПФ с постоянным основанием	640
10.4. Сопоставление объема вычислений при использовании оснований 2, 4 и 8	647
10.5. Эффекты квантования в алгоритмах БПФ	649
10.6. Особенности аппаратурной реализации БПФ с основанием 2	656

10.7. Оптимальная аппаратурная реализация алгоритма БПФ с основанием 2	659
10.8. Ускорение выполнения БПФ методами параллельной обработки	661
10.9. Выполнение БПФ с использованием сверхоперативной памяти	662
10.10. Параллельные структуры для алгоритмов БПФ с основаниями 2 и 4, использующие ЗУ с произвольным доступом	664
10.11. Общие вопросы построения поточных схем БПФ	667
10.12. Поточные схемы БПФ с основанием 2	668
10.13. Поточная схема БПФ с основанием 4	674
10.14. Сравнение поточных схем БПФ с основанием 2 и 4	679
10.15. Структуры БПФ с повышенным уровнем параллелизма	680
10.16. Общие принципы построения специализированных процессоров БПФ	684
10.17. БПФ перекрывающихся массивов на основе ЗУ с произвольным доступом	686
10.18. Свертка в реальном времени методом БПФ с использованием одного АУ и ЗУ с произвольным доступом	687
10.19. Поточный свертыватель с тактовой частотой 10 МГц	690
Литература	693
<b>Глава 11. Универсальные устройства в системах обработки сигналов</b>	<b>695</b>
11.1. Введение	695
11.2. Специализированные и универсальные вычислительные машины	696
11.3. Способы описания вычислительных машин	697
11.4. Программа вычисления скользящей суммы	699
11.5. Особенности ввода — вывода при обработке в реальном времени	701
11.6. Методы увеличения быстродействия вычислительной машины	703
11.7. Сверхоперативные ЗУ	704
11.8. Распараллеливание арифметических операций	705
11.9. Параллельная работа ЗУ, АУ, устройств управления и вызова команд	708
11.10. Быстродействующий цифровой процессор (FDP) Линкольн-новской лаборатории	708
11.11. Структурные схемы арифметических устройств	711
11.12. Синхронизация	712
11.13. Обзор методов увеличения быстродействия, использованных в FDP	714
11.14. Выполнение быстрого преобразования Фурье с помощью FDP	717
11.15. Подпрограммы для действий с плавающей запятой	718
11.16. Обзор особенностей FDP, связанных с распараллеливанием	720
11.17. Процессор Линкольновской лаборатории LSP2 (Lincoln Signal Processor 2) для обработки сигналов	723
11.18. Лабораторная вычислительная система для цифровой обработки сигналов	726
Литература	728
<b>Глава 12. Цифровая обработка речевых сигналов</b>	<b>729</b>
12.1. Введение	729
12.2. Модель образования речи	729
12.3. Кратковременный спектральный анализ	735
12.4. Система анализа — синтеза речи, основанная на кратковременном спектральном анализе	738
12.5. Особенности анализа речи	740
12.6. Система анализа — синтеза	745
12.7. Полосный вокодер	747
12.8. Анализаторы вокодеров. Особенности обработки сигналов	749
12.9. Синтезаторы вокодеров. Особенности обработки сигналов	750
12.10. Другие схемы вокодеров	753
12.11. Выделение высоты основного тона и обнаружение тон — шум	753
12.12. Обнаружитель тон — шум	760
12.13. Гомоморфная обработка речи	760
12.14. Гомоморфный вокодер	764
12.15. Формантный синтез	766
12.16. Цепь возбуждения звонких фрикативных звуков	770
12.17. Генератор случайных чисел	772
12.18. Цифровая обработка в формантном синтезаторе	773
12.19. Линейное прогнозирование речи	774
12.20. Система речевого ответа для вычислительной машины	778

12.21. Заключение	781
Литература	782
<b>Глава 13. Применения цифровой обработки в радиолокации</b>	<b>784</b>
13.1. Вводные замечания о принципах радиолокации и ее применениях	784
13.2. Состав и параметры радиолокационной системы	787
13.3. Выбор сигналов и функция неопределенности	791
13.4. Цифровые согласованные фильтры для радиолокационных сигналов	801
13.5. Аэродромный обзорный радиолокатор системы управления полетами. Доплеровская фильтрация как средство подавления мешающих отражений	812
13.6. Экспериментальный радиолокатор дальнего действия	823
13.7. Цифровой согласованный фильтр для высококачественного радиолокатора	829
13.8. Заключение	833
Литература	834
Предметный указатель	835