

Содержание

Предисловие	17
1. Введение	27
1.1. Цифровая обработка сигналов и ее преимущества	27
1.2. Области применения	29
1.3. Ключевые операции ЦОС	31
1.3.1. Свертка	31
1.3.2. Корреляция	33
1.3.3. Цифровая фильтрация	34
1.3.4. Дискретные преобразования	36
1.3.5. Модуляция	38
1.4. Процессоры для цифровой обработки сигнала	38
1.5. Обзор реальных областей применения ЦОС	39
1.6. Применение ЦОС при записи и воспроизведении звука	39
1.6.1. Цифровое микширование	39
1.6.2. Синтез и распознавание речи	41
1.6.3. Цифровая аудиосистема воспроизведения компакт-дисков	44
1.7. Применение ЦОС в телекоммуникации	48
1.7.1. Цифровые сотовые мобильные телефоны	48
1.7.2. Приставка для приема цифрового телевизионного сигнала	53
1.7.3. Адаптивное телефонное эхоподавление	53
1.8. Применение ЦОС в биомедицине	55
1.8.1. Изучение ЭКГ плода	56
1.8.2. Анестезия с регулированием по замкнутому циклу на основе ЦОС	58
1.9. Резюме	61
2. Аналоговый интерфейс ввода-вывода для систем ЦОС реального времени	63
2.1. Характерные системы ЦОС реального времени	64
2.2. Процесс преобразования аналогового сигнала в цифровой	65
2.3. Дискретизация — низкочастотные и полосовые сигналы	66
2.3.1. Дискретизация низкочастотных сигналов	67
2.3.2. Дискретизация полосовых сигналов	82
2.4. Однородное и неоднородное квантование и кодирование	90

Содержание	7
2.4.1. Однородное квантование и кодирование (линейная импульсно- кодовая модуляция, ИКМ)	92
2.4.2. Неоднородное квантование и кодирование (нелинейная ИКМ)	94
2.5. Выборка с запасом по частоте при аналого-цифровом преобразовании	96
2.5.1. Введение	96
2.5.2. Выборка с запасом по частоте и фильтры защиты от наложения спектров	97
2.5.3. Выборка с запасом по частоте и разрешающая способность АЦП	100
2.5.4. Применение выборки с запасом по частоте — однобитовый АЦП	104
2.6. Процесс цифроаналогового преобразования: восстановление сигнала	111
2.7. Цифроаналоговый преобразователь	111
2.8. Фильтры защиты от зеркальных частот	113
2.9. Выборка с запасом по частоте при цифроаналоговом преобразовании	113
2.9.1. Цифроаналоговое преобразование с запасом по частоте в проигрывателе компакт-дисков	115
2.10. Ограничения обработки сигналов в реальном времени с аналоговыми входными/выходными сигналами	117
2.11. Примеры применения	118
2.12. Резюме	118
3. Дискретные преобразования	135
3.1. Введение	135
3.1.1. Ряд Фурье	137
3.1.2. Преобразование Фурье	140
3.2. ДПФ и обратное ДПФ	143
3.3. Свойства ДПФ	150
3.4. Вычислительная сложность ДПФ	152
3.5. Алгоритм быстрого преобразования Фурье с децимацией во временной области	153
3.5.1. “Бабочка”	158
3.5.2. Выполнение алгоритма	160
3.5.3. Вычислительные преимущества БПФ	163
3.6. Обратное быстрое преобразование Фурье	163
3.7. Реализация БПФ	165
3.7.1. БПФ с частотной децимацией	165
3.7.2. Сравнение алгоритмов ВД и ЧД	165
3.7.3. Модификации для увеличения скорости	166
3.8. Другие дискретные преобразования	166
3.8.1. Дискретное косинус-преобразование	167
3.8.2. Преобразование Уолша	168
3.8.3. Преобразование Адамара	171
3.8.4. Вейвлетное преобразование	173
3.8.5. Вейвлетный метод кратномасштабного анализа	176

3.8.6. Представление сигнала с помощью сингулярностей: метод вейвлетного преобразования	178
3.9. Применение ДКП: сжатие изображений	183
3.9.1. Дискретное косинус-преобразование	184
3.9.2. Квантование коэффициентов двумерного ДКП	185
3.9.3. Кодирование	185
3.10. Примеры	186
Приложения	195
3.A. Программа на С для прямого вычисления ДПФ	195
3.B. Программа на С для двоичного БПФ с временной децимацией	201
3.B. ДПФ и БПФ в программном пакете MATLAB	204
4. Применение z-преобразования в обработке сигналов	207
4.1. Сигналы и системы дискретного времени	208
4.2. z-преобразование	209
4.3. Обратное z-преобразование	214
4.3.1. Метод степенных рядов	215
4.3.2. Метод разложения на элементарные дроби	217
4.3.3. Метод вычетов	223
4.3.4. Сравнение различных методов обратного z-преобразования	229
4.4. Свойства z-преобразования	229
4.5. Некоторые области применения z-преобразования в обработке сигналов	232
4.5.1. Описание систем дискретного времени с помощью полюсов и нулей	232
4.5.2. Оценка частотной характеристики	235
4.5.3. Геометрическая оценка	235
4.5.4. Непосредственный компьютерный расчет частотной характеристики	239
4.5.5. Вычисление частотной характеристики с помощью БПФ	240
4.5.6. Единицы измерения частоты, которые используются в системах дискретного времени	240
4.5.7. Исследование устойчивости	243
4.5.8. Разностные уравнения	244
4.5.9. Оценка импульсной характеристики	245
4.5.10. Применение в проектировании цифровых фильтров	247
4.5.11. Структуры реализации цифровых фильтров	248
4.6. Резюме	252
Приложения	261
4.A. Рекурсивный алгоритм вычисления обратного z-преобразования	261
4.B. Программа на С для оценки обратного z-преобразования и превращения последовательной структуры в параллельную	263
4.B. Программа на языке С для вычисления частотной характеристики	269
4.G. Операции z-преобразования с помощью программного пакета MATLAB	270

5.	Корреляция и свертка	281
5.1.	Введение	281
5.2.	Описание корреляции	282
5.2.1.	Взаимная корреляция и автокорреляция	288
5.2.2.	Применение корреляции	296
5.2.3.	Быстрая корреляция	306
5.3.	Описание свертки	311
5.3.1.	Свойства свертки	319
5.3.2.	Круговая свертка	320
5.3.3.	Идентификация систем	320
5.3.4.	Обращение свертки	322
5.3.5.	Слепое обращение свертки	323
5.3.6.	Быстрая линейная свертка	325
5.3.7.	Вычислительные преимущества быстрой линейной свертки	326
5.3.8.	Свертка и корреляция путем сегментации	327
5.3.9.	Метод наложения-сложения	329
5.3.10.	Метод наложения-записи	334
5.3.11.	Вычислительные преимущества быстрой свертки через сегментацию	337
5.3.12.	Связь между сверткой и корреляцией	338
5.4.	Реализация корреляции и свертки	339
5.5.	Примеры применения	339
5.5.1.	Корреляция	339
5.5.2.	Свертка	344
5.6.	Резюме	348
	Приложение	354
5.A.	Программа на языке C для расчета взаимной корреляции и автокорреляции	354
6.	Схема разработки цифровых фильтров	355
6.1.	Введение в цифровые фильтры	355
6.2.	Типы цифровых фильтров: КИХ- и БИХ-фильтры	357
6.3.	Выбор между КИХ- и БИХ-фильтрами	359
6.4.	Этапы разработки фильтра	362
6.4.1.	Спецификация требований	362
6.4.2.	Расчет коэффициентов	364
6.4.3.	Представление фильтра подходящей структурой	366
6.4.4.	Анализ влияния конечной разрядности	367
6.4.5.	Реализация фильтра	371
6.5.	Примеры	372
6.6.	Резюме	377

7. Разработка фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтров)	381
7.1. Вступление	382
7.1.1. Резюме по ключевым особенностям КИХ-фильтров	382
7.1.2. Линейная фазовая характеристика и ее следствия	382
7.1.3. Типы КИХ-фильтров с линейной фазовой характеристикой	385
7.2. Разработка КИХ-фильтров	388
7.3. Спецификации КИХ-фильтра	389
7.4. Методы расчета коэффициентов КИХ-фильтров	390
7.5. Метод взвешивания	390
7.5.1. Некоторые распространенные весовые функции	394
7.5.2. Метод взвешивания: резюме	397
7.5.3. Плюсы и минусы метода взвешивания	404
7.6. Оптимизационные методы	405
7.6.1. Основные концепции	406
7.6.2. Параметры, требуемые для использования оптимальной программы	409
7.6.3. Соотношения для оценки длины фильтра N	409
7.6.4. Резюме по процедуре вычисления коэффициентов фильтра с помощью оптимального метода	410
7.6.5. Примеры	411
7.7. Метод частотной выборки	418
7.7.1. Нерекурсивные фильтры частотной выборки	418
7.7.2. Рекурсивные фильтры частотной выборки	428
7.7.3. Фильтры частотной выборки с простыми коэффициентами	429
7.7.4. Метод частотной выборки: резюме	436
7.8. Сравнение метода взвешивания, оптимального метода и метода частотной выборки	437
7.9. Разработка КИХ-фильтров — специальные вопросы	439
7.9.1. Полуполосные КИХ-фильтры	439
7.9.2. Преобразование частоты	441
7.9.3. Вычислительно эффективные КИХ-фильтры	443
7.10. Структуры реализаций КИХ-фильтров	444
7.10.1. Трансверсальная структура	445
7.10.2. Структура с линейной фазовой характеристикой	446
7.10.3. Другие структуры	447
7.10.4. Выбор структуры	449
7.11. Влияние конечной разрядности на цифровые КИХ-фильтры	450
7.11.1. Ошибки квантования коэффициентов	451
7.11.2. Ошибки округления	457
7.11.3. Ошибки переполнения	458
7.12. Методы реализации КИХ-фильтров	459
7.13. Пример разработки	460
7.14. Резюме	464

Содержание	11
7.15. Примеры применения КИХ-фильтров	464
Приложения	481
7.A. Программы на С для разработки КИХ-фильтров	481
7.B. Разработка КИХ-фильтра с помощью MATLAB	485
7.B.1. Метод взвешивания	485
7.B.2. Оптимизационные методы	489
7.B.3. Метод частотной выборки	495
8. Разработка фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтров)	499
8.1. Вступление: резюме по основным характеристикам БИХ-фильтров	500
8.2. Этапы разработки цифровых БИХ-фильтров	501
8.3. Спецификация производительности	502
8.4. Методы расчета коэффициентов БИХ-фильтров	504
8.5. Расчет коэффициентов фильтра путем размещения нулей и полюсов	504
8.5.1. Основные концепции и пример разработки	504
8.6. Расчет коэффициентов методом инвариантного преобразования импульсной характеристики	508
8.6.1. Основные концепции и пример разработки	508
8.6.2. Метод инвариантного преобразования импульсной характеристики: резюме	511
8.6.3. Метод инвариантного преобразования импульсной характеристики: замечания	511
8.7. Расчет коэффициентов с помощью согласованного z-преобразования	513
8.7.1. Основные концепции и примеры разработки	513
8.7.2. Метод согласованного z-преобразования: резюме	516
8.7.3. Метод согласованного z-преобразования: замечания	516
8.8. Расчет коэффициентов с помощью билинейного z-преобразования	517
8.8.1. Основные концепции и примеры разработки	517
8.8.2. Метод билинейного z-преобразования: резюме	519
8.8.3. Метод билинейного z-преобразования: замечания	523
8.9. Использование для разработки БИХ-фильтров билинейного z-преобразования и классических аналоговых фильтров	527
8.9.1. Характерные особенности классических аналоговых фильтров	527
8.9.2. Методология билинейного z-преобразования с использованием классических аналоговых фильтров	530
8.9.3. Примеры разработки фильтров нижних частот, верхних частот, полосовых и режекторных	535
8.10. Расчет коэффициентов БИХ-фильтра путем отображения полюсов и нулей s-плоскости	544
8.10.1. Основные концепции	544
8.10.2. Примеры	549
8.11. Использование программ разработки БИХ-фильтров	553
8.12. Выбор метода расчета коэффициентов БИХ-фильтров	554
8.12.1. Эффект Найквиста	554

8.13. Структуры реализации цифровых БИХ-фильтров	562
8.13.1. Практические стандартные блоки БИХ-фильтров	562
8.13.2. Каскадная и параллельная реализации БИХ-фильтров больших порядков	565
8.14. Влияние конечной разрядности на БИХ-фильтры	569
8.14.1. Ошибки квантования коэффициентов	570
8.15. Реализация БИХ-фильтров	573
8.15.1. Требования к вычислениям	573
8.16. Подробный пример разработки цифрового БИХ-фильтра	574
8.17. Резюме	579
8.18. Примеры использования БИХ-фильтров в цифровых аудиосистемах и измерительных приборах	580
8.18.1. Цифровые аудиосистемы	580
8.18.2. Цифровое управление	580
8.18.3. Цифровые частотные осцилляторы	582
8.19. Примеры применения БИХ-фильтров в связи	582
8.19.1. Генерация и прием сигналов в цифровых кнопочных телефонах	583
8.19.2. Цифровая телефония: детектирование двухтонального многочастотного сигнала с использованием алгоритма Горцеля	585
8.19.3. Восстановление тактовой частоты в сфере передачи данных	590
Приложения	605
8.A. Программы на С для разработки БИХ-фильтров	605
8.A.1. Реализации на С инвариантного преобразования импульсной характеристики	606
8.B. Разработка БИХ-фильтров с помощью MATLAB	610
8.B.1. Вычисление квадратных корней из комплексных величин с использованием действительной арифметики	627
9. Цифровая обработка сигналов при нескольких скоростях	629
9.1. Введение	629
9.1.1. Некоторые области промышленного применения обработки данных при нескольких скоростях	630
9.2. Концепции обработки при нескольких скоростях	632
9.2.1. Уменьшение частоты дискретизации: децимация с целым шагом	632
9.2.2. Увеличение частоты дискретизации: интерполяция с целым шагом	633
9.2.3. Преобразование частоты дискретизации с нецелым шагом	635
9.2.4. Многокаскадное преобразование частоты дискретизации	639
9.3. Разработка практических конвертеров частоты дискретизации	640
9.3.1. Спецификация фильтра	640
9.3.2. Требования к фильтрам отдельных каскадов	642
9.3.3. Определение числа каскадов и шагов децимации	643
9.3.4. Примеры разработки	644
9.4. Программная реализация дециматоров	652
9.4.1. Программа многокаскадной децимации	653

Содержание	13
9.4.2. Тестовый пример использования программы децимации	655
9.5. Программная реализация интерполяторов	655
9.5.1. Программа многокаскадной интерполяции	659
9.5.2. Тестовый пример	661
9.6. Преобразование частоты дискретизации с использованием многофазного фильтра	663
9.6.1. Многофазная реализация интерполяторов	663
9.7. Примеры применения	668
9.7.1. Высококачественное аналого-цифровое преобразование в цифровом аудио	669
9.7.2. Эффективное аналого-цифровое преобразование в высококачественных системах воспроизведения компакт-дисков	669
9.7.3. Сбор высококачественных данных	671
9.7.4. Узкополосная цифровая фильтрация с обработкой при нескольких скоростях	676
9.7.5. Узкополосный спектральный анализ с высоким разрешением	683
9.8. Резюме	683
Приложения	693
9.A. Программы на С для разработки и реализации систем обработки при нескольких скоростях	693
9.B. Цифровая обработка сигналов с помощью MATLAB	693
10. Адаптивные цифровые фильтры	699
10.1. Когда и где стоит использовать адаптивные фильтры	699
10.2. Концепции адаптивной фильтрации	701
10.2.1. Адаптивные фильтры как средство подавления шума	701
10.2.2. Другие конфигурации адаптивного фильтра	702
10.2.3. Основные компоненты адаптивного фильтра	702
10.2.4. Адаптивные алгоритмы	702
10.3. Основы теории фильтров Винера	705
10.4. Стандартный адаптивный алгоритм наименьших квадратов	708
10.4.1. Реализация стандартного алгоритма наименьших квадратов	709
10.4.2. Практические ограничения стандартного алгоритма наименьших квадратов	712
10.4.3. Другие алгоритмы на основе схемы наименьших квадратов	715
10.5. Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов	717
10.5.1. Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов	718
10.5.2. Ограничения рекурсивного алгоритма наименьших квадратов	719
10.5.3. Алгоритмы факторизации	719
10.6. Сфера приложения 1 — адаптивная фильтрация окулярных артефактов на ЭЭГ человека	720
10.6.1. Физиологическая задача	720
10.6.2. Алгоритм обработки артефактов	721
10.6.3. Реализация в реальном времени	723

10.7. Сфера приложения 2 — адаптивное телефонное эхоподавление	723
10.8. Другие приложения	725
10.8.1. Громкоговорящие телефоны	725
10.8.2. Компенсация многолучевого распространения	725
10.8.3. Адаптивное подавление преднамеренной помехи	727
10.8.4. Обработка сигналов с радаров	727
10.8.5. Отделение сигналов речи от фонового шума	727
10.8.6. Наблюдение за плодом — подавление ЭКГ матери при родах	728
Приложения	731
10.A. Программа на С для адаптивной фильтрации	731
10.A.1. Адаптивное выделение узкополосных сигналов, спрятанных в шуме	732
10.B. Программы MATLAB для адаптивной фильтрации	736
11. Оценка и анализ спектра	737
11.1. Введение	737
11.2. Принципы оценки спектра	740
11.3. Традиционные методы	742
11.3.1. Подводные камни	743
11.3.2. Взвешивание	746
11.3.3. Метод и свойства периодограмм	756
11.3.4. Методы модифицированных периодограмм	759
11.3.5. Метод Блэкмена–Тьюки	760
11.3.6. Метод быстрой корреляции	761
11.3.7. Сравнение методов оценки спектральной плотности мощности	761
11.4. Современные параметрические методы оценки	762
11.5. Авторегрессионная оценка спектра	763
11.5.1. Авторегрессионная модель и авторегрессионный фильтр	763
11.5.2. Спектральная плотность мощности авторегрессионного ряда	764
11.5.3. Расчет параметров модели — уравнения Юла–Уокера	765
11.5.4. Решение уравнений Юла–Уокера	767
11.5.5. Порядок модели	769
11.6. Сравнение методов оценки	770
11.7. Примеры применения	770
11.7.1. Использование спектрального анализа с помощью ДПФ для различения болезней мозга	770
11.7.2. Спектральный анализ ЭЭГ с использованием авторегрессионного моделирования	773
11.8. Резюме	774
11.9. Разобранный пример	774
Приложение	781
11.A. Программы MATLAB для оценки и анализа спектра	781

12.	Универсальные и специализированные процессоры ЦОС	783
12.1.	Вступление	784
12.2.	Компьютерные архитектуры обработки сигналов	784
12.2.1.	Гарвардская архитектура	786
12.2.2.	Конвейерная обработка	788
12.2.3.	Аппаратный умножитель-накопитель	792
12.2.4.	Специальные команды	795
12.2.5.	Средства дублирования	798
12.2.6.	Встроенная память/кэш	799
12.2.7.	Расширенный параллелизм — SIMD, VLIW и статическая суперскалярная обработка	799
12.3.	Универсальные процессоры ЦОС	804
12.3.1.	Процессоры ЦОС с фиксированной запятой	805
12.3.2.	Процессоры ЦОС с плавающей запятой	815
12.4.	Выбор цифрового процессора сигналов	818
12.5.	Реализация алгоритмов ЦОС на универсальных процессорах ЦОС	820
12.5.1.	Цифровая КИХ-фильтрация	820
12.5.2.	Цифровая БИХ-фильтрация	829
12.5.3.	Расчет БПФ	836
12.5.4.	Обработка при нескольких скоростях	842
12.5.5.	Адаптивная фильтрация	845
12.6.	Специализированная аппаратура ЦОС	847
12.6.1.	Аппаратные цифровые фильтры	848
12.6.2.	Аппаратные процессоры БПФ	849
12.7.	Резюме	852
	Приложение	859
12.A.	Программы на языке ассемблера TMS320 для обработки сигналов в реальном времени и программа на языке С для двоичного БПФ с постоянной геометрией	859
13.	Анализ эффектов конечной разрядности в системах ЦОС с фиксированной запятой	867
13.1.	Вступление	867
13.2.	Арифметика ЦОС	868
13.2.1.	Арифметика с фиксированной запятой	870
13.2.2.	Арифметика с плавающей запятой	874
13.3.	Шум квантования АЦП и качество сигнала	877
13.4.	Эффекты конечной разрядности в цифровых БИХ-фильтрах	880
13.4.1.	Влияние структуры фильтра на эффекты конечной разрядности	881
13.4.2.	Ошибки квантования коэффициентов	884
13.4.3.	Требования к длинам коэффициентов с точки зрения устойчивости и желаемой частотной характеристики	886
13.4.4.	Ошибки переполнения при сложении	890
13.4.5.	Принципы масштабирования	892

13.4.6. Масштабирование при каскадной реализации	895
13.4.7. Масштабирование в параллельной реализации	896
13.4.8. Детектирование и предотвращение переполнения на выходе	898
13.4.9. Ошибки округления произведения в цифровых БИХ-фильтрах	898
13.4.10. Влияние ошибок квантования на производительность фильтра	900
13.4.11. Шум округления в каскадных и параллельных реализациях	904
13.4.12. Влияние шума округления произведения в современных системах ЦОС	909
13.4.13. Схемы снижения шума округления	910
13.4.14. Определение практических значений коэффициентов обратной связи по ошибке	916
13.4.15. Граничный цикл вследствие ошибок округления произведений	921
13.4.16. Другие нелинейные явления	922
13.5. Эффекты конечной разрядности в алгоритмах БПФ	923
13.5.1. Ошибки округления в БПФ	923
13.5.2. Ошибки переполнения и масштабирование в БПФ	926
13.5.3. Квантование коэффициентов в БПФ	927
13.6. Резюме	928
Приложения	933
13.A. Программа анализа эффектов конечной разрядности для БИХ-фильтров	933
13.B. Уравнения масштабных множителей L_2	933
14. Приложения и разобранные примеры	935
14.1. Платы для демонстрации обработки сигналов в реальном времени	935
14.1.1. Основы	935
14.1.2. Целевая плата TMS320C10	936
14.1.3. Демонстрационный модуль для ЦОС реального времени	937
14.1.4. Демонстрационные платы TMS320C54 и DSP56300	938
14.2. Приложения ЦОС	939
14.2.1. Детектирование сердцебиения плода во время родов	939
14.2.2. Адаптивное устранение окулярных артефактов с ЭКГ человека	948
14.2.3. Выравнивание цифровых аудиосигналов	964
14.3. Модельные задачи	967
14.4. Вопросы по ЦОС для компьютерных тестов	975
14.5. Резюме	983
Приложение	986
14.A. Модифицированный алгоритм UD-факторизации	986