

вершенствующейся областью электроники. Несомненно также, что цифровая техника, включая цифровую обработку сигналов, будет все шире применяться в радиолокации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Radar Handbook, Skolnik M., ed., McGraw-Hill, N. Y., 1970; есть русский перевод: Справочник по радиолокации, под ред. Скольника М., изд-во «Советское радио», 1976.
2. Gold B., Muehe C. E., Digital Signal Processing for Range-Gated Pulse Doppler Radars, *Agard Conference Proceedings*, No. 66 (1970).
3. Blankenship P., Hofstetter E., Digital Pulse Compression via Fast Convolution, submitted to *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*.
4. Muehe C. E. et al., New Techniques Applied to Air Traffic Control Radars, *Proc. IEEE*, 62, No. 6, 716—723 (June 1974); есть русский перевод: Муэ и др., *ТИИЭР*, 62, № 6 (1974).
5. Delong D. F., Jr., Hofstetter E. M., On the Design of Optimum Radar Waveforms for Clutter Rejection, *IEEE Trans. on Information Theory*, IT-13, No. 3, 454—463 (July 1967).
6. Klauder J. R., Price A. C., Darlington S., Albershein W. J., The Theory and Design of Chirp Radars, *Bell Syst. Tech. J.*, 39, 1—76, No. 4 (July 1960).
7. Cook C. E., Bernfeld M., Radar Signals, Academic Press, N. Y., 1967.
8. Rihaczek A. M., Principles of High-Resolution Radar, McGraw-Hill, N. Y., 1969.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автокорреляция 444
 Алгоритм без замещения 635
 — с замещением 635
 АЛУ (арифметико-логическое устройство) 559—561
 Аналитический сигнал 87
 Аналоговые фильтры, преобразования полюсы 286, 287
 Апертура 788
 Арифметика по модулю 465, 466
 АРУ (автоматическая регулировка усиления) 752, 753
 АЦП (аналого-цифровое преобразование) 328—333
 — шум 328

Баттерворта фильтры 253—255
 Бесселя фильтры 255—257
 Бесселя функции, программа расчета 121
 Билинейное преобразование 244—249
 БИХ-фильтры 228—326
 — линейность фазовой характеристики 231
 — методы расчета во временной области 296—297
 — — — всепропускающие цепи в w -плоскости 304—309
 — — — линейное программирование 310—314
 — — — минимизация L_p -ошибки 301—304
 — — — среднеквадратической ошибки 298—301
 — — — оптимизация 297—315
 — — — по квадрату амплитудной характеристики 292—294
 БИХ- и КИХ-фильтры, сравнение 315—325
 Блестяна алгоритм 433—435
 Боковые лепестки 106
 БПФ 394—421
 — алгоритмы 633—647
 — базовая операция («бабочка») 400—401, 481—483, 635
 — граф 397, 481—483
 — квантование коэффициентов 655, 656
 — Кули — Тьюки алгоритм (см. Прореживание по времени)
 — нумерация 640—647
 — поточный алгоритм 661, 667—684
 — программа 404—407
 — процессоры 633—693
 — — алгоритмы с основанием 2 656—662
 — — параллельная обработка 661, 662
 — — параллельные с памятью произвольного доступа 664—667

БПФ процессоры
 — — — поточные схемы 661, 667—679
 — — — с основанием 2 668—674
 — — — с основанием 4 674—679
 — — — свертыватели 687—693
 — — — сверхпараллелизм 662
 — — — со сверхоперативной памятью 662—664
 — — — с перекрытием и памятью с произвольным доступом 686
 — — — с перекрытием циклов памяти и АУ 659
 — — — с повышенным уровнем параллелизма 680—684
 — — — сравнение поточных схем по основаниям 2 и 4 679, 680
 — — с гребенкой фильтров 424—429
 — «скачущее» 427, 429
 — скользящее 422, 423
 — спектральный анализ 423—441
 — сравнение оснований 647—649
 — шум округления 649—655
 — эффекты квантования 649—656
 Булева алгебра 541—546
 Бута алгоритм 571

Ввод — вывод, обработка в реальном времени 701—703
 Взвешивания метод 103—124
 — — — примеры 110—117, 119—124
 Вокодер 747—753
 — анализатор 749, 750
 — синтезатор 750—753
 — полосный 747—749
 Волновые вытянутые сфероидальные функции 109
 Восстанавливающий фильтр ЦАП 334
 Временная область, расчет БИХ-фильтров 294—297
 Всепропускающая цепь 229
 Всепропускающий выравниватель 320
 Второго порядка система 29—33
 — — — разностное уравнение 29
 — — — частотная характеристика 33
 Вычетов теорема 344
 Вычислительная система лабораторная 726—728

Генератор синусно-косинусный цифровой 621—626
 Генераторы гауссовых случайных чисел 629—631
 — — — на базе матриц Адамара 630
 — псевдослучайных чисел 626—631

Генераторы случайных чисел с равномерным распределением 626—629
Генераторы
Гиббса явление 104
Гомоморфная обработка речи 760—764
Гомоморфный вокодер 764—766
Групповая задержка 94, 234

Двумерные БИХ-фильтры 497—502
— ДПФ 495, 496
— КИХ-фильтры 502—510
— обработка сигналов 484—532
— окна 503, 504
— оптимальные фильтры 521—524
— разностные уравнения 488, 489
— ряды Фурье 490, 491
— сигналы 484—486
— системы 486, 487
— фильтры 487—528
— критерий устойчивости 487, 488, 498—502
— расчет 486—528
— частотные выборки 510—519
— частотные характеристики 489—492
z-преобразования 492, 493
Делители 580—586
Дискретизации теорема 37—39
Дискретное преобразование Гильберта 81—87
— — действительных сигналов 84—87
Дискретные временные сигналы (см. Последовательности)
Дискретные и непрерывные системы, взаимосвязь 37—39
Дискретный ряд Фурье 35, 36
Дисперсия шума, установившегося значение 347
Дифференциаторы оптимальные 187—193
— расчет методом частотной выборки 143, 144
Длина волны 788
Доплеровская фильтрация 789, 790
Дополнительный код 335
ДПФ (дискретное преобразование Фурье) 62—72
— взаимосвязь с z-преобразованием 68
— наложение 69
— периодических последовательностей 63, 64
— последовательностей конечной длины 64
— свойства 70—72

Единица окружность 42
Единичный импульс цифровой (единичный отсчет) 19
— скачок 20

Замещение 635

ИЛИ 541, 542
ИЛИ — НЕ 542
Импульсная характеристика 23
— — бесконечной длины 40
— — конечной длины 39
Инвариантное преобразование импульсной характеристики 240—244
Инверсия двойная 402—405, 634, 640—647
— — счетчик 403
И — НЕ 542
Интерполятор нулевого порядка для ЦАП 333
ИС (интегральные схемы) 546
— биполярные 547

ИС вентили 556—558
— ДТЛ (диодно-транзисторная логика) 550
— логические функции 541—546
— МДП (металл — диэлектрик — полупроводник) 547, 553—556
— — дополняющие 556
— нагрузочная способность 543, 548—550
— память 566—568
— пластмассовый корпус 556
— РТЛ (резистивно-транзисторная логика) 541
— с диодами Шоттки 550
— таблица истинности 541
— ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика) 541
— — быстродействующая 550
— униполярные 547, 553—556
— ЭСЛ (эммитерно-связанная логика) 541, 551

Квадрат амплитудной характеристики 233
Квантование коэффициентов 372—388
— — двухполюсный фильтр 382, 383
— — каскадная форма КИХ-фильтра 387, 388
— — оптимальные методы 378—381
— — прямая форма БИХ-фильтра 374—377
— — — КИХ-фильтра 384—387
— — статистическая модель 373—378

Кенстр 762
КИХ-фильтры 89—227
— линейность фазовой характеристики 91—95
— непосредственное сравнение 207, 208
— нули, расположение 99—103
— ограничение на число экстремумов 148—151
— ограничения во временной и частотной областях 204—207
— оптимальные 163—187
— программа расчета 210—227
— прямая форма 58, 59
— свойства 90
— частотная характеристика 95—99
— чебышевские решения 173
Колебания переполнения 362, 363
— предельного цикла 388—392
Комплексная свертка, теорема 47
— экспонента 21
Конгруэнтный метод 626
Корреляционная функция 444, 447
Корреляционный метод спектрального анализа 447—457
Коши теорема 83
Круговая корреляция 446, 447
— свертка 73
— симметрия 504, 514—522, 524—528

Лагранжа структура 60
Линейное программирование 129—131
— — расчет БИХ-фильтров 310—314
— — расчет оптимальных КИХ-фильтров 162, 163
Линейность фазовой характеристики, условия 91—103, 231, 232
Линейные системы 22
— — дискретная свертка 23
— — определение 22
— — с постоянными параметрами (ЛПШ-системы) 22
Линия задержки многоотводная 59

Максимально гладкие фильтры (см. Бесселя фильтры, Баттерворта фильтры)
Мантисса 337
Маска, изготовление 594
Масштабирование по максимуму 369
— — сумме 369
Масштабирующие коэффициенты 57
Мертвая зона 389
Минимально-фазовая система 84
Многополосные фильтры оптимальные 201—204
Мультиплексирование 611

Накрутка 537
Наложение 39, 243
Насыщенная логика 548
Неравнозначность (см. Сложение по модулю 2)
Неразделимость 487
Нормализация 587
Нули зеркально отображенные 100, 101
Ньютона структура 62

Обобщенные структуры 58
Обработка изображений 530—532
Обратное теоретико-числовое преобразование 469—475
— z-преобразование 43, 44
Обратные разности 237, 238
Обратный код 335
ОДПФ (обратное дискретное преобразование Фурье) 63, 64, 410, 411
Окно Блэкмана 124
— Дольфа — Чебышева 110, 123
— Кайзера 109, 113, 114
— при взаимной корреляции 455
— спектральном анализе 429—431
— прямоугольное 106, 107
— треугольное 124
— Ханна 107
— Хэмминга 107
— — обобщенное 107—109
Округление 328, 329, 841, 342
Оптимальный расчет (минимаксная ошибка) 144—207
Основание 2, алгоритмы БПФ 394—410, 419—421, 656—661
Основной тон 753—760
— — выделение 753—760
— — период 734, 753—760
Отображение дифференциалов 236—240
Отрицательная логика 557

Паде аппроксимация 295—297
Память 566—568
— биполярная с произвольным доступом 566
— динамическая 566
— ППЗУ (программируемое ПЗУ) 566
— сверхоперативная 704, 705
— с последовательным доступом 566
— с произвольным доступом 566
— статическая 566
Паразитный фильтр 375
Парсвэлла теорема 47
Первого порядка система 29—30
— — разностное уравнение 29
— — частотная характеристика 30
Передаточная функция 52—62
Перенос, время распространения 570, 574
— циклический 473
Перестановка, алгоритм БПФ 634
— матричная 640

Периодограмма 458
Периодограммы модифицированные 457—463
Печатная плата 536
ПЗУ (постоянное запоминающее устройство) 566
Плавающая запятая
— — аппарата 580, 586—590
— — арифметика 336—338
Поворачивающие множители 402, 634
Положительная логика 557
Полосовые сигналы, дискретизация 86, 87
— фильтры, частотная выборка 141
Полосы 40
— и нули 42
— — графическое изображение 42
— — объединение в пары 56
Порядок 336
Последовательности, задержка 45
— конечной длины 39
— максимальной длины 772
— определение 18
— перемножение 46
— представление 19
— свертка 45
Построение устройства 534
Преобразование Фурье, геометрическая интерпретация 50
Преобразователь временного разделения в частотное 617—620
Преобразователь Гильберта 85
— оптимальный 193—201
Приемник клавишно-тонального вызова 615—617
Прореживание БПФ по времени 395—402, 634
— — по частоте 407—410, 634
Процессор FDP 708—722
— БПФ, программа 717, 718
— методы увеличения быстродействия 714—717
— синхронизация 713, 714
— структура АУ 711—713
Процессор LSP 2 723—726
ПРУ (программная регулировка усиления) 823
Прямой код 335
— — усечение 331
Пульсации 105

Радиолокатор аэродромный обзорный 812—823
— дальнего действия 823—829
— разрешение по дальности 789
— систем управления полетами 875
— условия работы 786
— характеристики 787—790
Радиолокация 784
— выбор сигналов 791—801
— применение цифровой обработки 784—834
— скатие импульсов 827—829
Разделимость 487
Разложение на простые дроби 44, 56
Разности 236—239
— обобщенные 239
— обратные 236, 237
— прямые 236, 238, 239
Разностные уравнения второго порядка 29
— — L-го порядка 50
— — однородное решение 28
— — первого порядка 29
— — решение с применением одностронного z-преобразования 49, 50
— — решение 26—30
— — частное решение 28

Реализуемость физическая 25
 Регистры сдвига, МДП 566
 Резонатор цифровой 34 (см. Второго порядка система)
 Релеевское распределение 631
 Ремса алгоритм замены 157—160, 308
 Речь 734—782
 — анализ — синтез 734—778
 — гласные 732, 733
 — глухие звуки 729
 — голосовая щель 731
 — голосовой тракт 730, 731
 — звонкие звуки, синтез 770—773
 — каналный анализатор, сглаживание спектра 750—753
 — линейное прогнозирование 774—778
 — модель образования 729—735
 — обнаружитель тон — шум 760
 — реверберация 742—745
 — речевого ответа ЦВМ, система 778—781
 — сжатие полосы 733, 747—749
 — синтезатор 766—781
 — цифровая обработка 729—782
 Рэйдера теоретико-числовое преобразование 475

Свертка 23
 — линейная (аперриодическая) 74—76
 — перекрытия с накоплением метод 78—81
 — — суммированием метод 76—78
 — периодическая (круговая) 72—74
 — секционирование 76—81
 Синтезатор частот цифровой 621—626
 Системная функция (см. Передаточная функция)
 Скользящая сумма, программа 699—701
 Скользящий спектр 422
 Сложение по модулю 2 542, 543
 Согласованная фильтрация в радиолокации 801—811
 Согласованное z -преобразование 249—252
 Спектральная плотность мощности 442—444
 Спектральное разрешение 424—426
 Спектральные измерения 441—463
 Спектральный анализ 421—441
 — — кратковременный 735—738
 Специализированные ЦВМ 696, 697
 Сумматор одноразрядный 544

Теоретико-числовое преобразование 463—480
 Трансверсальный фильтр 59
 Триггеры 561—563
 Тэйлора структура 62

Узел 397
 — граф 397
 — разветвления 350
 — суммирования 350
 Умножители 568—580
 — матричные 571—580, 590—595
 Усечение 329, 340, 341
 Ускорение переноса 576
 Установления время 570
 Устойчивость 25

Фазовая задержка 94
 — характеристика 233, 234
 Фазовые множители (см. Поворачивающие множители)
 Ферма теорема 469
 — числа 475

Ферма числовое преобразование 475, 476
 Фиксированная запятая 335, 336
 Флетчера — Пауэла алгоритм 298
 ФНЧ (фильтры нижних частот) аналоговые, методы расчета 252—265
 — расчетные диаграммы 265—279
 — частотная выборка 136—140
 Функция допуска 379
 Функция неопределенности 791—801
 — — ЛЧМ-сигнала 793—798
 — — монохроматического радиоимпульса 799
 — — пачки импульсов 800, 801

ЦАП (цифро-аналоговое преобразование) 333—335
 ЦВМ (описание) 697—699
 — универсальная 696, 697

Цифровая техника, введение 534—596
 Цифровые устройства с высоким уровнем параллелизма 606—609
 — — каскадная форма БИХ-фильтра 610, 611
 — — — — КИХ-фильтра 602—608
 — — — — прямая форма БИХ-фильтра 609, 610
 — — — — КИХ-фильтра 606—609
 — — — — расчленение цифрового фильтра 620, 621

Цифровые фильтры, дополнительный 243
 — — каноническая форма 55
 — — каскадная форма 56, 59
 — — КИХ-структуры 58—62
 — — масштабируемые с дополнительной пульсацией 164
 — — нерекурсивная реализация 52
 — — нули и полюсы, попарный подбор 358—360
 — — параллельная форма 57
 — — параметр D 110, 116, 178
 — — последовательная форма (см. Каскадная форма)
 — — — — преобразование полосы 286—289
 — — — — прямая форма 1 53, 59
 — — — — прямая форма 2 54, 55
 — — расчет по квадрату амплитудной характеристики 292—294
 — — рекурсивная реализация 52
 — — с максимумом пульсаций 151
 — — — — полиномиальная интерполяция 153—157
 — — — — решение нелинейного уравнения 151—153
 — — — — равновеликими пульсациями 144—207, 263—285
 — — — — связанная форма 383
 — — — — сравнение билинейного и инвариантного преобразований 279—285
 — — — — упорядочение блоков 56, 358—360
 — — — — формы построения 52—62
 — — эллиптические с выравниванием групповой задержки 319—325

Частота, единицы измерения 36
 Частотная выборка, расчет фильтров 61, 62, 124—126
 — ось, нелинейное искажение 247
 Частотная характеристика 30
 — — системы второго порядка 33
 — — — — первого порядка 32
 Частотной выборки метод 124—129
 Частотные преобразования 285—292
 Чебышева аппроксимация 144—148
 — обобщенная теорема 148
 — фильтры 257—262

Чебышева фильтры типа I и II 257—260

Шум квантования 328
 — округления, дисперсия 351
 — — каскадная форма КИХ-фильтра 366—370
 — — нерекурсивные структуры с фиксированной запятой 363—370
 — — норма в L_p 352
 — — ограничение динамического диапазона 349—363
 — — параллельная форма 356, 357
 — — — — прямая форма БИХ-фильтра 355, 356
 — — — — — КИХ-фильтра 364—366
 — — рекурсивные структуры с плавающей запятой 370—372
 — — — — фиксированной запятой 342—358

Эллиптические фильтры 263—265, 268, 273
 Энергетический спектр (см. Спектральная плотность мощности)
 — — анализ 441—463
 Эрмита структура 62

z -преобразование, взаимосвязь с преобразованием Фурье 41—43
 — конечных последовательностей 39
 — обратное 43, 44
 — одностороннее 48
 — определение 39
 — свойства 44—48
 — с ЛЧМ-фильтрацией 435—441
 — физически реализуемых последовательностей 40

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5	2.24. Линейная свертка конечных последовательностей	74
Глава 1. Введение	9	2.25. Секционированные свертки	76
1.1. Краткий исторический очерк и некоторые комментарии	9	2.26. Дискретное преобразование Гильберта	81
1.2. Обзор основных направлений цифровой обработки сигналов	12	2.27. Преобразование Гильберта действительных сигналов	84
1.3. Построение книги	14	Литература	
Глава 2. Теория дискретных линейных систем	18	Глава 3. Теория и расчет цифровых фильтров с импульсными характеристиками конечной длины	89
2.1. Введение	18	3.1. Введение	89
2.2. Последовательности	18	3.2. Порядок расчета фильтров	89
2.3. Представление произвольных последовательностей	22	3.3. Свойства КИХ-фильтров	90
2.4. Линейные системы с постоянными параметрами	22	3.4. Характеристики КИХ-фильтров с линейной фазовой характеристикой	91
2.5. Физическая реализуемость. Устойчивость	25	3.5. Частотная характеристика КИХ-фильтров с линейной фазой	95
2.6. Разностные уравнения	26	3.6. Расположение нулей КИХ-фильтров с линейной фазой	99
2.7. Частотная характеристика	30	3.7. Методы расчета КИХ-фильтров с линейными фазами	103
2.8. Частотная характеристика систем первого порядка	32	3.8. Первый метод расчета — метод взвешивания	103
2.9. Частотная характеристика систем второго порядка	33	3.9. Прямоугольное окно	106
2.10. Дискретный ряд Фурье	35	3.10. «Обобщенное» окно Хэмминга	107
2.11. Замечания о единицах измерения частоты	36	3.11. Окно Кайзера	109
2.12. Соотношение между непрерывными и дискретными системами	36	3.12. Примеры фильтров нижних частот с различными окнами	110
2.13. z -преобразование	39	3.13. Особенности использования метода взвешивания	117
2.14. Соотношение между z -преобразованием и фурье-преобразованием последовательности	41	3.14. Несколько практических приемов использования окон	119
2.15. Обратное z -преобразование	43	3.15. Дополнительные примеры фильтров, рассчитанных методом взвешивания	122
2.16. Свойства z -преобразования	44	3.16. Общая характеристика окон	124
2.17. Решение разностных уравнений с применением одностороннего z -преобразования	49	3.17. Второй метод проектирования — метод частотной выборки	124
2.18. Геометрическая интерпретация преобразования Фурье	50	3.18. Решение задачи оптимизации	127
2.19. Построение цифровых фильтров (структурные схемы фильтров)	52	3.19. Линейное программирование	129
2.20. Структурные схемы фильтров без полюсов	58	3.20. Фильтры с частотной выборкой вида 1 и 2	131
2.21. Дискретное преобразование Фурье	62	3.21. Фильтры вида 1 с частотной выборкой и линейной фазой	132
2.22. Свойства ДПФ	70	3.22. Фильтры вида 2 с частотной выборкой и линейной фазой	134
2.23. Свертка последовательностей	72	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 минимальной 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	174
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	240
Глава 4. Теория и аппроксимация цифровых фильтров с бесконечными импульсными характеристиками	228
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

Глава 5. Эффекты конечной разрядности чисел в цифровых фильтрах	327
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 двухполюсном 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
Глава 6. Спектральный анализ и быстрое преобразование Фурье . .	394
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 Блестейна	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
Глава 7. Введение в теорию двумерной обработки сигналов	484
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
Глава 8. Введение в цифровую технику	534
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
Глава 9. Специализированные устройства для цифровой фильтрации и генерации сигналов	597
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
Глава 10. Специализированные устройства для выполнения БПФ	633
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 аппаратной реализации БПФ с основанием 2	656
10.7. Оптимальная аппаратная 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
Глава 11. Универсальные устройства в системах обработки сигналов	695
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. Распаралеливание арифметических операций	705
11.9. Параллельная работа ЗУ, АУ, устройств управления и вызова команд	708
11.10. Быстродействующий цифровой процессор (FDP) Линкольновской 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 распаралеливанием	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
Глава 12. Цифровая обработка речевых сигналов	729
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 фриктивных 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
Глава 13. Применения цифровой обработки в радиолокации	784
13.1. Вводные замечания о принципах радиолокации и ее приме- нениях	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 подавле- ния 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

ИБ № 467

Л. Рабинер, Б. Гоулд

**ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

Редактор Л. Якименко

Художник И. Богачев Художественный редактор В. Бисенгалиев
Технический редактор Е. Потапенкова Корректор В. Соколов

Сдано в набор 23.09.77. Подписано к печати 01.03.78. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага типографская № 1. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать, 26,50 бум. л.,
53 печ. л., уч.-изд. л.50,07. Зак. 0399. Цена 3 р. 90 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7 «Искра революции»
Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Москва, К-1, Трехпрудный пер., 9