

Оглавление

Предисловие	4
Часть I. Дискретные сигналы и дискретные цепи	5
1. Дискретные сигналы	5
1.1. Основные определения, понятия и особенности цифровой обработки сигналов	5
1.2. Частота Найквиста Дискретизация аналоговых сигналов	7
1.3. Дискретные сигналы	8
1.4. Связь спектров аналогового и дискретизированного сигналов	10
1.5. Ошибки наложения спектров и способы их уменьшения	12
1.6. Прямое и обратное преобразование Фурье дискретных сигналов	17
1.7. Некоторые свойства (теоремы) спектров дискретных сигналов	18
1.8. Теорема Котельникова во временной области	20
1.9. Примеры и задачи	22
2. Z-преобразование дискретных сигналов	28
2.1. Прямое и обратное Z -преобразование	28
2.2. Условие сходимости и область сходимости Z -преобразования	28
2.3. Основные свойства (теоремы) Z -преобразования	30
2.4. Методы определения дискретного сигнала (последовательности отсчетов) по его Z -преобразованию	32
2.5. Связь между Z -преобразованием, преобразованием Лапласа и преобразованием Фурье дискретного сигнала и наоборот	35
2.6. Связь между точками комплексной плоскости P и точками комплексной плоскости Z	37
2.7. Примеры и задачи	38
3. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ)	45
3.1. Прямое и обратное дискретное преобразование Фурье	45

3.2. Связь между ДПФ последовательности, Z -преобразованием и преобразования Фурье этой последовательности и наоборот	48
3.3. Ошибки наложения во временной области	50
3.4. Связь ДПФ последовательности с преобразованием Фурье этой последовательности	51
3.5. Теорема Котельникова в частотной области	52
3.6. Теоремы (свойства) дискретного преобразования Фурье	52
3.7. Быстрое преобразования Фурье	58
3.8. Примеры и задачи	64
4. Дискретные системы (дискретные цепи)	72
4.1. Разностные уравнения дискретной цепи	72
4.2. Рекурсивные и нерекурсивные дискретные цепи	75
4.3. Передаточная функция дискретной цепи (системная функция)	76
4.4. Формы реализации дискретных цепей (фильтров)	78
4.5. Звенья дискретных цепей (фильтров) и виды их соединений	82
4.6. Добротность полюсов передаточной функции	84
4.7. Условия устойчивости и реализуемости вещественной дискретной цепи (фильтра)	85
4.8. Методы определения выходного дискретного сигнала	86
4.9. Примеры и задачи	86
5. Характеристики дискретных цепей (фильтров)	94
5.1. Комплексная частотная характеристика дискретной цепи	94
5.1.1. Основные свойства частотных характеристик	95
5.1.2. Нормирование частоты частотных характеристик ...	96
5.2. Импульсная характеристика дискретной цепи	97
5.3. Устойчивость дискретной цепи во временной области	98
5.4. Связь импульсной характеристики и передаточной функции	99
5.5. Связь комплексной частотной характеристики и ДПФ импульсной характеристики дискретной цепи	101
5.6. Связь передаточной функции $H(z)$ и ДПФ конечной импульсной характеристики цепи	101
5.7. Примеры и задачи	103
6. Основные методы цифровой фильтрации	112
6.1. Линейная дискретная свертка	112
6.2. ДПФ как дискретная фильтрация	113

6.3. Круговая дискретная свертка	115
6.4. Секционная фильтрация методом перекрытия с суммированием	118
6.5. Секционная фильтрация методом перекрытия с накоплением	121
6.6. Примеры и задачи	127
7. Корреляционный анализ детерминированных и случайных дискретных сигналов	133
7.1. Корреляционная функция непериодического детерминированного дискретного сигнала и ее свойства	133
7.2. Корреляционная функция периодического детерминированного дискретного сигнала и ее свойства	134
7.3. Случайные дискретные сигналы и процессы	135
7.3.1. Вероятностные функциональные характеристики случайных дискретных сигналов	135
7.3.2. Вероятностные числовые характеристики случайных дискретных сигналов	139
7.3.3. Вероятностные временные характеристики случайных дискретных сигналов	140
7.3.4. Спектральные характеристики случайных дискретных сигналов	142
7.4. Прохождение случайного дискретного сигнала через дискретную цепь	145
7.5. Примеры и задачи	150
Часть II. Цифровые фильтры и методы их проектирования	158
8. Шумы квантования входного сигнала и шумы	158
8.1. Форматы представления чисел в цифровых фильтрах	158
8.2. Модель процесса квантования сигнала	161
8.3. Ошибки усечения и округления при квантовании сигнала (числа)	162
8.4. Детерминированные и вероятностные оценки ошибок квантования сигнала	165
8.5. Влияние шума квантования входного сигнала на шум (ошибку) выходного сигнала	167
8.6. Эффекты округления результатов арифметических операций	170
8.7. Влияние шумов квантования входного сигнала и округления промежуточных результатов вычислений на ошибку выходного сигнала в рекурсивных фильтрах ..	171
8.8. Влияние шумов квантования входного сигнала и округления результатов умножений на ошибку выходного сигнала в нерекурсивных фильтрах	173

8.9. Предельные циклы, обусловленные ошибками округления результатов умножения	176
8.10. Примеры и задачи	179
9. Расчет разрядностей регистров входного сигнала и регистров оперативной памяти результата умножения в фильтрах	186
9.1. Расчет разрядностей регистров оперативной памяти нерекурсивных фильтров	186
9.1.1. Расчет разрядностей регистров входного сигнала и регистров выходного сигнала по вероятностной модели ошибок квантования	187
9.1.2. Расчет разрядностей регистров входного сигнала и регистров выходного сигнала по заданному динамическому диапазону входного сигнала и отношению сигнал-шум на выходе фильтра	188
9.2. Расчет разрядности регистров оперативной памяти рекурсивных фильтров	189
9.2.1. Расчет разрядностей регистров входного сигнала и оперативной памяти (умножителей и сумматоров) по вероятностным моделям ошибок квантования	189
9.2.2. Расчет разрядностей регистров входного сигнала и оперативной памяти (умножителей и сумматоров) по детерминированным моделям ошибок квантования	195
9.3. Примеры и задачи	196
10 Квантование коэффициентов цифровых фильтров. Эффекты квантования	205
10.1. Расчет разрядности коэффициентов нерекурсивных ЦФ	205
10.1.1. Квантование коэффициентов при реализации нерекурсивного фильтра с линейной фазой в прямой форме ...	205
10.1.2. Квантование коэффициентов при реализации нерекурсивных фильтров с линейной фазой в каскадной форме.	210
10.2. Расчёт разрядности коэффициентов рекурсивных ЦФ	211
10.2.1. Расчет разрядностей регистров коэффициентов по вероятностной модели ошибок квантования при заданной дисперсии АЧХ фильтра	212
10.2.2. Расчет разрядностей коэффициентов по вероятностной модели ошибок квантования при заданной относительной погрешности АЧХ фильтра	216
10.2.3. Расчет разрядностей коэффициентов по вероятностной модели ошибок квантования на основе функции чувствительности при заданной относительной погрешности АЧХ фильтра	218

10.2.4. Расчёт разрядности коэффициентов по детерминированной модели ошибок квантования методом проб при заданной относительной погрешности АЧХ фильтра	220
10.2.5. Расчёт разрядностей коэффициентов по детерминированной модели ошибок квантования по передаточной функции при заданной относительной погрешности АЧХ фильтра	222
10.2.6. Расчет разрядностей коэффициентов по детерминированной модели ошибок квантования на основе функции чувствительности при заданной относительной погрешности АЧХ фильтра	223
10.3. Примеры и задачи	224
11. Ограничение (масштабирование) динамического диапазона в цифровых фильтрах	233
11.1. Ограничение динамического диапазона в цифровых рекурсивных фильтрах	233
11.1.1. Краткая теория методов масштабирования	233
11.1.2. Масштабирование при ограничении максимума амплитуды входного сигнала	236
11.1.3. Масштабирование при ограничении максимума модуля спектра входного сигнала	240
11.1.4. Масштабирование при ограничении мощности (энергии) входного сигнала	242
11.1.5. Масштабирование при ограничении среднего значения модуля спектра входного сигнала	243
11.1.6. Ограничение динамического диапазона (масштабирование) рекурсивных фильтров в каскадной форме	244
11.1.7. Ограничение динамического диапазона (масштабирование) рекурсивных фильтров в параллельной форме	246
11.2. Упорядочение размещения блоков при построении рекурсивных фильтров в каскадной форме	248
11.3. Ограничение динамического диапазона (масштабирование) нерекурсивных фильтров с линейной фазой в каскадной форме	250
11.4. Порядок размещения блоков нерекурсивных фильтров в каскадной форме	251
11.5. Примеры и задачи	252
12. Основы теории нерекурсивных цифровых фильтров (КИХ-фильтров)	260
12.1. КИХ-фильтры с линейной фазой вида 1	260
12.2. КИХ-фильтры с линейной фазой вида 2	262
12.3. КИХ-фильтры с линейной фазой вида 3	265
12.4. КИХ-фильтры с линейной фазой вида 4	267
12.5. Расположение нулей КИХ-фильтров с линейной фазой	270

12.6. Примеры и задачи	271
13. Проектирование нерекурсивных цифровых фильтров (КИХ-фильтров)	278
13.1. Методы проектирования цифровых фильтров	278
13.2. Прямые субоптимальные методы проектирования КИХ-фильтров	280
13.2.1. Проектирование КИХ-фильтров методом частотной выборки Явление Гиббса	280
13.2.2. Проектирование КИХ-фильтров методом взвешивания	285
13.3. Примеры и задачи	290
14. Методы проектирования рекурсивных цифровых фильтров (БИХ-фильтров)	297
14.1. Прямые методы проектирования БИХ-фильтров	297
14.1.1. Субоптимальные методы проектирования	300
14.1.2. Оптимальные методы проектирования	301
14.2. Методы проектирования БИХ-фильтров по аналоговому прототипу	302
14.2.1. Метод численного интегрирования	302
14.2.2. Метод инвариантности импульсной характеристики	307
14.2.3. Метод билинейного Z -преобразования	309
14.2.4. Метод обобщенного билинейного Z -преобразования	313
14.2.5. Метод цифрового частотного преобразования	316
14.3. Примеры и задачи	323
Часть III. Методы и алгоритмы адаптивной обработки сигналов	335
15. Введение в адаптивную обработку сигналов	335
15.1. Свойства адаптивных систем	335
15.2. Различные структуры адаптивных систем	337
15.3. Основные устройства адаптивной обработки сигналов и их краткая характеристика	338
15.4. Методы оптимального оценивания	340
16. Обработка сигналов адаптивным линейным сумматором	341
16.1. Адаптивный линейный сумматор	341
16.2. Рабочая функция (среднеквадратическая ошибка) и ви-неровское оценивание	343
16.3. Свойства рабочей функции	245
16.4. Примеры и задачи	349
17. Методы и алгоритмы поиска рабочей функции	364

17.1. Градиентные методы поиска минимума рабочей функции и их краткая характеристика	364
17.2. Метод Ньютона	367
17.3. Метод наискорейшего спуска	370
17.4. Обучающие кривые методов Ньютона и наискорейшего спуска	373
17.5. Примеры и задачи	374
18. Методы оценки градиента рабочей функции и влияние ошибки оценки градиента на процесс адаптации	385
18.1. Методы измерения и ошибки измерения производной рабочей функции (ошибки оценки градиента)	385
18.2. Определение дисперсии оценки градиента рабочей функции	388
18.3. Влияние ошибки оценки градиента на процесс поиска оптимальных весовых коэффициентов адаптивного линейного сумматора	389
18.3.1. Влияние ошибки оценки градиента на процесс поиска оптимальных весовых коэффициентов методом Ньютона и методом наискорейшего спуска	389
18.3.2. Ковариационная матрица вектора весовых коэффициентов метода Ньютона и метода наискорейшего спуска ..	391
18.4. Среднее значение рабочей функции метода Ньютона и метода наискорейшего спуска	392
18.5. Постоянная времени сходимости процесса, постоянная времени обучающей кривой и постоянная времени адаптации методов Ньютона и наискорейшего спуска	393
18.6. Относительное среднее значение рабочей функции методов Ньютона и наискорейшего спуска	397
18.7. Сравнение методов Ньютона и наискорейшего спуска	399
18.8. Примеры и задачи	401
19. Адаптивная обработка сигналов адаптивными КИХ и БИХ-фильтрами методом наименьших квадратов	416
19.1. Поиск оптимальных весовых коэффициентов адаптивным КИХ-фильтром методом наименьших квадратов	416
19.2. Сходимость метода наименьших квадратов	417
19.3. Обучающая кривая метода наименьших квадратов ...	419
19.4. Влияние ошибки оценки градиента на поиск оптимального вектора весовых коэффициентов	420
19.5. Относительное среднее значение рабочей функции ...	421
19.6. Сравнение метода наименьших квадратов и метода наискорейшего спуска	422

19.7. Поиск оптимальных весовых коэффициентов адаптивным БИХ-фильтром методом наименьших квадратов	424
19.8. Примеры и задачи	427
20. Адаптивная обработка сигналов адаптивными КИХ- и БИХ-фильтрами методом последовательной регрессии	450
20.1. Идеальный алгоритм поиска оптимальных весовых коэффициентов	450
20.2. Метод и алгоритм последовательной регрессии при обработке сигналов адаптивными КИХ-фильтрами	452
20.3. Метод и алгоритм последовательной регрессии при обработке сигналов адаптивными БИХ-фильтрами	456
20.4. Примеры и задачи	458
Литература	482