

Содержание

Предисловие	11
Благодарности	13
Глава 1. Ширина и глубина распространения цифровой обработки сигналов	14
1.1. Истоки ЦОС	14
1.2. Связь	17
1.2.1. Мультиплексирование	17
1.2.2. Сжатие	18
1.2.3. Эхоподавление	18
1.3. Обработка звуковых сигналов	19
1.3.1. Музыка	19
1.3.2. Синтез речи	19
1.3.3. Распознавание речи	20
1.4. Эхолокация	21
1.4.1. Радиолокация	21
1.4.2. Гидролокация	22
1.4.3. Сейсморазведка методом отражённых волн	22
1.5. Обработка изображений	23
1.5.1. Изображения в медицине	23
1.5.2. Изображения, получаемые в космосе	24
1.5.3. Коммерческие продукты	25
Глава 2. Математическая статистика и случайные сигналы	26
2.1. Сигналы и их графическое отображение	26
2.2. Среднее значение и среднеквадратическое отклонение	28
2.3. Сигналы и процессы	33
2.4. Гистограмма, распределение вероятностей, функция плотности вероятности	35
2.5. Нормальное распределение	43
2.6. Генерация цифрового шума	47
2.7. Точность и погрешность	50
Глава 3. АЦП и ЦАП	53
3.1. Теорема отсчётов	57
3.2. Цифро-аналоговое преобразование	64
3.3. Аналоговые фильтры преобразования данных	67
3.4. Выбор антиэлайзингового фильтра	75
3.5. Многоскоростная обработка в процессе аналого-цифрового преобразования	79
3.6. Однобитные аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование	81
Глава 4. Программное обеспечение ЦОС	88
4.1. Представление чисел в компьютере	88
4.2. Числа в формате с фиксированной точкой (целочисленный формат)	89
4.3. Числа в формате с плавающей точкой (вещественный формат)	91
4.4. Точность представления чисел	94
4.5. Скорость вычислений: влияние языка программирования	98
4.6. Скорость вычислений: влияние аппаратной платформы	104

4.7. Скорость вычислений: советы для программистов	109
Глава 5. Линейные системы	112
5.1. Сигналы и системы	112
5.2. Условия линейности системы	114
5.3. Статическая характеристика и передача гармонических сигналов	117
5.4. Примеры линейных и нелинейных систем	120
5.4.1. Примеры линейных систем (процессов)	120
5.4.2. Примеры нелинейных систем	121
5.5. Особые свойства линейности	121
5.6. Принцип суперпозиции — фундаментальное понятие ЦОС	123
5.7. Наиболее распространённые виды декомпозиции	126
5.7.1. Импульсная декомпозиция	126
5.7.2. Ступенчатая декомпозиция	128
5.7.3. Декомпозиция на основе сигналов с чётной и нечётной симметрией	128
5.7.4. Декомпозиция с прореживанием	129
5.7.5. Декомпозиция Фурье	130
5.8. Если система нелинейна	132
Глава 6. Свёртка	134
6.1. Дельта-функция и импульсная характеристика	134
6.2. Свёртка	136
6.3. Описание свёртки со стороны входа системы	139
6.4. Описание свёртки со стороны выхода системы	143
6.5. Сумма взвешенных входных отсчётов	149
Глава 7. Свойства свёртки	151
7.1. Типовые импульсные характеристики	151
7.1.1. Единичный импульс	151
7.1.2. Процедуры дифференциального и интегрального исчисления	153
7.1.3. Фильтры нижних и верхних частот	156
7.1.4. Каузальные и некаузальные сигналы	158
7.1.5. Сигналы с нулевой, линейной и нелинейной фазой	159
7.2. Математические свойства свёртки	161
7.2.1. Свойство коммутативности	161
7.2.2. Свойство ассоциативности	161
7.2.3. Свойство дистрибутивности	162
7.2.4. Преемственность между входом и выходом	163
7.2.5. Центральная предельная теорема	164
7.3. Корреляция	165
7.4. Скорость вычислений	168
Глава 8. Дискретное преобразование Фурье	170
8.1. Преобразование Фурье	170
8.2. Действительное ДПФ: терминология и обозначения	176
8.3. Независимая переменная при описании в частотной области	178
8.4. Базисные функции ДПФ	180
8.5. Синтез сигнала с помощью обратного ДПФ	182
8.6. Анализ сигналов на основе ДПФ	187
8.6.1. Вычисление ДПФ решением системы уравнений	187
8.6.2. Вычисление ДПФ с помощью свёртки	188
8.7. Дуальность	192
8.8. Форма представления в полярных координатах	192
8.9. Проблемы представления в полярных координатах	195

8.9.1. Проблема 1: радианы или градусы?	195
8.9.2. Проблема 2: ошибка деления на ноль	196
8.9.3. Проблема 3: неоднозначность значений арктангенса	197
8.9.4. Проблема 4: неправильная фаза при очень маленьких значениях модуля	197
8.9.5. Проблема 5: неоднозначность периода фазы 2π	198
8.9.6. Проблема 6: модуль всегда положителен (неоднозначность половины периода фазы π)	199
8.9.7. Проблема 7: скачки между π и $-\pi$	200
Глава 9. Применение ДПФ	201
9.1. Спектральный анализ сигналов	201
9.2. Частотные характеристики систем	210
9.3. Свёртка в частотной области	213
Глава 10. Свойства преобразования Фурье	219
10.1. Линейность преобразования Фурье	219
10.2. Свойства фазовой характеристики	222
10.3. Периодичность сигналов ДПФ	229
10.4. Сжатие и расширение сигналов. Многоскоростная обработка	235
10.5. Умножение сигналов (амплитудная модуляция)	239
10.6. Преобразование Фурье дискретного времени	241
10.7. Уравнение Парсевала	243
Глава 11. Пары Фурье-преобразований	245
11.1. Единичный импульс	245
11.2. Функция $\sin(x)/x$	248
11.3. Другие пары преобразований Фурье	251
11.4. Колебания Гиббса	254
11.5. Гармоники	256
11.6. ЛЧМ-сигналы	259
Глава 12. Быстрое преобразование Фурье	262
12.1. Комплексное ДПФ для действительных сигналов	262
12.2. Как работает алгоритм БПФ	265
12.3. Примеры программной реализации БПФ	270
12.4. Сравнение по точности и быстродействию	275
12.5. Дополнительное повышение быстродействия	277
Глава 13. Аналоговая обработка сигналов	282
13.1. Дельта-функция	282
13.2. Операция свёртки	284
13.3. Интеграл Фурье	290
13.4. Ряд Фурье	293
Глава 14. Введение в цифровую фильтрацию	299
14.1. Основные понятия	299
14.2. Формы представления информации в сигнале	303
14.3. Временные характеристики	304
14.4. Частотные характеристики	305
14.5. Высокочастотные, полосовые и режекторные фильтры	310
14.6. Классификация фильтров	314
Глава 15. Однородные фильтры	316
15.1. Однородные нерекурсивные фильтры	316
15.2. Переходная характеристика и подавление шума	317

15.3. Частотная характеристика	319
15.4. Модифицированные однородные фильтры	320
15.5. Однородные рекурсивные фильтры	322
Глава 16. Оконные фильтры	325
16.1. Принципы построения оконных фильтров	325
16.2. Расчёт оконного фильтра	329
16.3. Примеры использования оконных фильтров	332
16.4. Достижение сверхвысокой точности	336
Глава 17. Специальные фильтры	338
17.1. АЧХ произвольной формы	338
17.2. Коррекция (выравнивание) частотной характеристики	342
17.3. Оптимальная фильтрация	349
Глава 18. Быстрая свёртка	353
18.1. Свёртка с секционированием	353
18.2. Быстрая свёртка	355
18.3. Сокращение вычислительных затрат	360
Глава 19. Рекурсивные фильтры	362
19.1. Рекурсивный метод	362
19.2. Однополюсный рекурсивный фильтр	365
19.3. Узкополосный рекурсивный фильтр	369
19.4. ФЧХ рекурсивных фильтров	371
19.5. Применение целочисленной арифметики	375
Глава 20. Фильтры Чебышева	377
20.1. Частотные характеристики фильтров Чебышева и Баттерворта	377
20.2. Расчёт фильтра	378
20.3. Переходная характеристика и перерегулирование	386
20.4. Устойчивость	387
Глава 21. Сравнительный анализ фильтров	392
21.1. Первый раунд: аналоговый фильтр против цифрового	392
21.2. Второй раунд: оконный фильтр против фильтра Чебышева	395
21.3. Третий раунд: однородный фильтр против однополюсного	398
Глава 22. Обработка звука	400
22.1. Слух человека	400
22.2. Тембр	404
22.3. Компромисс между качеством звука и частотой дискретизации	407
22.4. Аудио высокого качества	408
22.5. Компандирование	412
22.6. Синтез и распознавание речи	413
22.7. Нелинейная обработка звуковых сигналов	418
Глава 23. Формирование и демонстрация изображений	422
23.1. Структура цифрового изображения	422
23.2. Фотоаппарат и глаз человека	425
23.3. Телевизионный видеосигнал	434
23.4. Другой способ формирования и демонстрации изображений	436
23.5. Регулировка яркости и контрастности	437
23.6. Преобразование шкалы серого	441
23.7. Деформирование изображений	443

Глава 24. Линейная обработка изображений	447
24.1. Свёртка	447
24.2. Модификация границ с помощью ФРТ размерностью 3×3 пикселя	452
24.3. Свёртка при выполнении условия сепарабельности	454
24.4. ФРТ большой размерности. Выравнивание освещённости	457
24.5. Фурье-анализ изображений	461
24.6. Быстрая свёртка	466
24.7. Более внимательный взгляд на свёртку изображений	469
Глава 25. Особые методы обработки изображений	473
25.1. Пространственное разрешение	473
25.2. Шаг и апертура выборки	480
25.3. Отношение сигнал/шум	483
25.4. Морфологическая обработка изображений	487
25.5. Компьютерная томография	493
Глава 26. Нейронные сети	503
26.1. Задача обнаружения	503
26.2. Архитектура нейронных сетей	510
26.3. Почему это работает?	515
26.4. Обучение нейронной сети	517
26.5. Оценка результатов	525
26.6. Проектирование рекурсивных фильтров	528
Глава 27. Сжатие данных	534
27.1. Стратегии сжатия данных	534
27.2. Кодирование длин серий	536
27.3. Кодирование Хаффмана	538
27.4. Дельта-кодирование	540
27.5. LZW-сжатие	541
27.6. Сжатие с преобразованием	548
27.7. MPEG	555
Глава 28. Цифровые сигнальные процессоры	557
28.1. Чем ЦСП отличаются от других микропроцессоров	557
28.2. Циклическая буферизация	560
28.3. Архитектура цифрового сигнального процессора	563
28.4. Процессоры с фиксированной и плавающей точкой	569
28.5. Си или Ассемблер?	576
28.6. Насколько быстры ЦСП?	582
28.7. Рынок цифровых сигнальных процессоров	588
Глава 29. Начинаем работать с ЦСП	592
29.1. Семейство ADSP-2106х	592
29.2. Стартовый набор SHARC EZ-KIT Lite	594
29.3. Пример проектирования: КИХ-фильтр обработки аудиосигналов	596
29.4. Аналоговые измерения с помощью цифровых систем	599
29.5. К вопросу о выборе фиксированной или плавающей точки	601
29.6. Более мощные программные инструменты	604
Глава 30. Комплексные числа	610
30.1. Основные понятия	610
30.2. Полярная форма записи комплексных чисел	614
30.2.1. Метод замещения комплексными числами	617

30.3. Комплексное представление синусоидальных функций	619
30.4. Описание систем с использованием комплексных чисел	621
30.5. Анализ электрических цепей	622
Глава 31. Комплексное преобразование Фурье	627
31.1. Вещественное ДПФ	627
31.2. Математическая эквивалентность	629
31.3. Комплексное ДПФ	630
31.4. Семейство преобразований Фурье	635
31.4.1. Четвёрка преобразований Фурье	635
31.4.2. Вещественные и комплексные преобразования	636
31.4.3. Анализ и синтез	636
31.4.4. Система обозначений во временной области	636
31.4.5. Система обозначений в частотной области	636
31.4.6. Уравнения анализа	637
31.4.7. Уравнения синтеза	637
31.4.8. Масштабирование	637
31.4.9. Другие формы записи уравнений	638
31.5. Зачем использовать комплексное преобразование Фурье?	638
Глава 32. Преобразование Лапласа	642
32.1. Понятие S -плоскости	642
32.2. Стратегия преобразования Лапласа	649
32.3. Анализ электрических схем	654
32.4. Значение нулей и полюсов	658
32.5. Расчёт фильтров в S -области	661
Глава 33. Z-преобразование	667
33.1. Понятие Z -плоскости	667
33.2. Анализ рекурсивных систем	672
33.3. Каскадное и параллельное соединения	677
33.4. Инверсия АЧХ	681
33.5. Нормировка коэффициента усиления	683
33.6. Расчёт фильтров. Метод Чебышева–Баттерворта	685
33.6.1. Основной цикл программы	685
33.6.2. Объединение коэффициентов	688
33.6.3. Вычисление координат полюсов фильтра на S -плоскости	688
33.6.4. Преобразование окружности в эллипс	689
33.6.5. Переход от аналогового фильтра к цифровому	691
33.6.6. Преобразование НЧ-фильтра в НЧ-фильтр	693
33.6.7. Преобразование НЧ-фильтра в ВЧ-фильтр	694
33.7. Две стороны ЦОС: хорошая и плохая	694
Глоссарий	695
Предметный указатель	713

Предисловие

Цель и стратегия книги

Технический мир меняется очень быстро. Всего за 15 лет мощность персональных компьютеров возросла в тысячу раз, и, по всем прогнозам, возрастёт ещё в тысячу раз в течение следующих 15 лет¹⁾. Громадные вычислительные мощности изменили пути развития науки и техники, и цифровая обработка сигналов (ЦОС) — прекрасное тому подтверждение.

В начале 1980-х годов ЦОС изучали в высших учебных заведениях при подготовке магистров электротехнических специальностей. Спустя десятилетие ЦОС вошла в состав стандартных дисциплин базовых университетских курсов. Сегодня ЦОС стала неотъемлемой частью основных навыков, необходимых учёным и инженерам разных специальностей. К сожалению, университетский курс по цифровой обработке сигналов не смог приспособиться к такой перемене. Почти все учебники по этой дисциплине написаны в традиционном электротехническом стиле с характерными для него математическими подробностями и скрупулёзностью. Возможности ЦОС просто огромны, но, не постигнув эту науку, вы не сможете ими воспользоваться.

Эта книга предназначена для широкого круга научных работников и инженеров различных областей: физики, биоинженерии, геологии, океанографии, машиностроения, электротехники и многих других сфер. Целью её написания является идея освещения практических методов и приёмов без привлечения математических подробностей и абстрактной теории. Для воплощения этой идеи в ходе написания книги были реализованы три следующих принципа.

Во-первых, технические приёмы не только доказываются с помощью математических выражений, но и подробно объясняются. Хотя в книгу включено много математики, она не используется как основное средство для подачи материала. Ничто не может сравниться с интересным, хорошо написанным разделом книги, сопровождаемым замечательными примерами и иллюстрациями.

Во-вторых, комплексное исчисление рассматривается в тематических разделах повышенной сложности, к изучению которых приступают только после того, как усвоены основные понятия. Вся базовая теория ЦОС объясняется в главах 1...29 с использованием простых алгебраических выражений, и только в редких случаях применяются элементарные операции интегрального и дифференциального исчислений. В главах 30...33 показано, как математика

¹⁾ Книга была опубликована в 2003 году, а написана автором в конце предыдущего столетия. — *Примеч. пер.*

комплексных чисел расширяет возможности цифровой обработки сигналов, предлагая приёмы, которые не могут быть реализованы с помощью действительных чисел. Многие могут назвать такой подход лженаучным, ведь классические учебники по цифровой обработке сигналов просто наводнены математикой комплексных чисел, зачастую начиная с первых страниц.

В-третьих, в книге используются совсем простые компьютерные программы. Большинство реальных программ цифровой обработки сигналов пишется на языках Си, Фортран или других, им подобных. Однако изучение ЦОС ставит совсем иные требования, нежели её практическое использование. Студентам необходимо сосредоточить своё внимание на алгоритмах и методах обработки, не отвлекаясь на особенности определённого языка. Простота программ в данном случае очень важный фактор. Программы в этой книге написаны таким образом, чтобы обучать методам цифровой обработки сигналов в наиболее доступной форме, при этом все остальные факторы воспринимаются как вторичные. Хорошим стилем программирования можно и пренебречь, если это позволит получить более понятную логику программы. Например:

- используется упрощённая версия языка программирования Бейсик;
- используется нумерация строк;
- из управляющих структур используются только циклы вида FOR-NEXT;
- не используются команды ввода/вывода.

Этот стиль программирования — самый простой из всех известных. Возможно, кто-то подумает, что язык программирования Си больше подошёл бы для данной книги. Я бы не стал участвовать в таком споре.

Круг читателей

Данная книга задумывалась в первую очередь как одногодичный практический курс по цифровой обработке сигналов для студентов, обучающихся по различным специальностям. Предполагается предварительное знакомство читателей со следующими дисциплинами:

- практической электроникой (операционными усилителями, *RC*-цепями и т. д.);
- программированием (на языках Фортран или других);
- дифференциальным и интегральным исчислением.

Книга написана также с учётом интересов специалистов, уже использующих ЦОС в практической работе. В ней обсуждается целый ряд наиболее распространённых приложений цифровой обработки сигналов: цифровые фильтры, нейронные сети, сжатие данных, обработка звука, изображений и т. д. Данные темы обсуждаются по возможности в специальных главах, так, чтобы читателю не пришлось перелистывать всю книгу в поисках методов решения конкретной задачи.

Благодарности

Хочу выразить особую благодарность многочисленным рецензентам, которые поделились своими комментариями и предложениями по поводу данной книги: Магнус Аронссон (факультет электротехники, университет штата Юта); Брюс Б. Азими (военно-морские силы США); Вернон Л. Чи (факультет вычислительной техники, университет Северной Каролины); Манохар Дас, доктор философии (факультет электротехники и системотехники, Оклендский университет); Кэрол А. Дин (компания Analog Devices); Фред ДеПьеро, доктор философии (факультет электротехники, Калифорнийский государственный политехнический университет); Джоуз Фридман, доктор философии (компания Analog Devices); Фредерик К. Дюеннебиер, доктор философии (факультет геологии и геофизики, университет Гавайи, Маноа); Д. Ли Фюгаль (компания Space & Signals Technologies); Филсон Х. Планз, доктор философии (факультет электронной и компьютерной техники, университет г. Нью-Гемпшир); Кеннет Х. Джэкер (факультет вычислительной техники Аппалачский университет); Раджив Кападиа, доктор философии (факультет электротехники, университет г. Манкато); Дэн Кинг (компания Analog Devices); Кевин Лири (компания Analog Devices); Дэйл Мэгоун, доктор философии (факультет вычислительной техники, университет северо-восточной Луизианы); Бен Мбугуа (компания Analog Devices); Бернард Максум, доктор философии (факультет электротехники, университет Ламара); Пол Морган, доктор философии (факультет геологии, университет Северной Аризоны); Дейл Мюглер (факультет математической науки, университет Акрона); Кристофер Л. Муллен, доктор философии (факультет гражданской инженерии, университет Миссисипи); Синтия Л. Нельсон, доктор философии (Национальная лаборатория Сандия); Бранислава Перуничич-Дразенович, доктор философии (факультет электротехники, университет Ламара); Джон Шмельк, доктор философии (математический факультет, университет содружества Вирджинии); Ричард Р. Шульц, доктор философии (факультет электротехники, университет Северной Дакоты); Дэвид Скольник (компания Analog Devices); Джей Л. Смит, доктор философии (центр аэрокосмических технологий, университет Джорджии); Джеффри Смит, доктор философии (факультет компьютерных наук, университет штата Джорджия); Оскар Янез Суарес, доктор философии (факультет электротехники, университет метрополии, кампус Ицтапалапу, г. Мехико) и другие рецензенты, которые пожелали остаться неизвестными.

Теперь книга в руках последнего рецензента — в ваших руках. Пожалуйста, потратьте немного времени, чтобы поделиться со мной комментариями и предложениями. Благодаря этому следующее издание будет ещё лучше отвечать вашим потребностям. Всё, что нужно для этого сделать, — отправить небольшое электронное письмо на адрес: Smith@DSPguide.com. Это займёт у вас не более двух минут. Благодарю. Надеюсь, книга вам понравится.

Стив Смит, январь 1999

ШИРИНА И ГЛУБИНА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) представляет собой одну из наиболее мощных технологий, которая в XXI веке будет определять дальнейшее развитие науки и техники. Революционные изменения уже свершились в *широком* поле сфер деятельности — связи и телерадиовещании, радио- и гидролокации, высококачественном звуковоспроизведении и сжатии изображений и т. д. Каждой из этих областей присуще своё собственное, *глубоко* проработанное направление развития ЦОС со своими алгоритмами, математическим аппаратом и специализированными методами. Очевидно, что освоить все технологии цифровой обработки сигналов, которые существуют на сегодняшний день, практически невозможно. Поэтому изучение методов ЦОС целесообразно разбить на две задачи: изучение общих концепций, справедливых для всех направлений цифровой обработки сигналов, и изучение специализированных методов, применяемых в сфере ваших интересов. В этой главе мы начнём наше путешествие в мир цифровой обработки сигналов и увидим, какой весьма значительный эффект произвела она в различных областях науки и техники. Итак, вперёд!

1.1. Истоки ЦОС

Цифровая обработка сигналов отличается от других наук о вычислительных системах уникальным типом данных, с которым она работает, — *сигналами*. В большинстве случаев сигналы формируются на основе информации, получаемой от датчиков, которые фиксируют явления реального мира: сейсмические вибрации, оптические изображения, звуковые волны и т. д. ЦОС представляет собой совокупность математических методов, алгоритмов и технических приёмов, которые используются для управления сигналами после того, как они были преобразованы в цифровую форму. Обработка сигналов может решать множество задач, среди которых повышение качества изображений, распознавание и синтез речи, сжатие данных для их последующего хранения и передачи и т. д. Предположим, мы подключили аналогово-цифровой преобразователь к компьютеру и используем его для получения цифровых данных из реального мира. В этом случае ЦОС позволяет ответить на вопрос: «*Что дальше?*»

Цифровая обработка сигналов появилась в 1960—1970-е годы, во времена, когда впервые стали доступны цифровые компьютеры. Стоимость компьютеров в те годы была довольно высока, и применение ЦОС ограничивалось только некоторыми критически важными задачами. Первые попытки применения цифровой обработки были предприняты в четырёх ключевых областях: *в радиолокации и гидролокации* как важных составляющих национальной безопасности; *при поиске новых нефтяных месторождений*, т. к. эта сфера сулит большие доходы; *при исследо-*

вании космического пространства, где обрабатываются уникальные данные; в рентгенографии, используемой для спасения человеческих жизней. Революция в сфере персональных компьютеров 1980—1990-х годов стала причиной развития ЦОС в новых областях науки и техники. Несмотря на заинтересованность некоторых военных и государственных кругов в использовании ЦОС только для своих задач, цифровая обработка неожиданно стала развиваться по законам свободного рынка. Все, кто хотел заработать деньги в этой быстро развивающейся области, становились поставщиками ЦОС-продуктов. Цифровая обработка сигналов для широкого круга потребителей стала доступна в таких средствах, как мобильные телефоны, CD-плееры, электронная голосовая почта и др. На Рис. 1.1 показаны некоторые из приложений ЦОС.

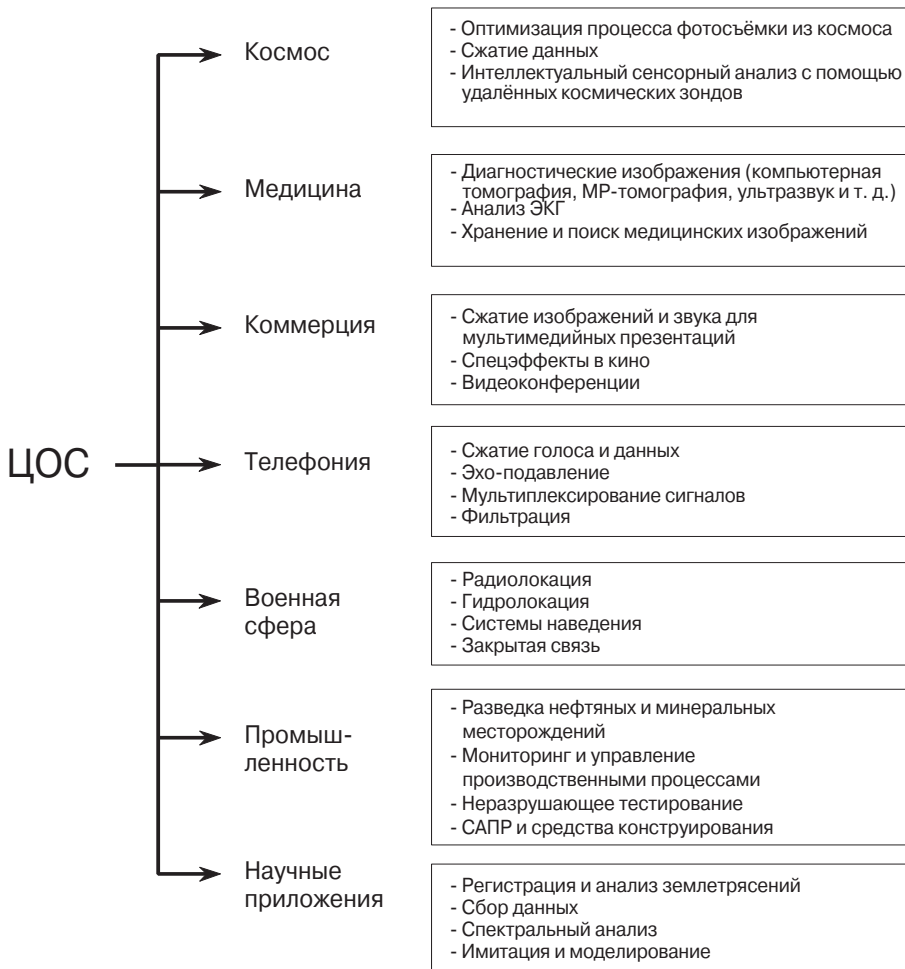


Рис. 1.1. ЦОС осуществила перелом во многих сферах науки и техники. Некоторые из них представлены на этом рисунке.

Эта технологическая революция развивалась по принципу «сверху вниз». В начале 1980-х годов ЦОС изучали в высших учебных заведениях при подготовке магистров электротехнических специальностей. Спустя десятилетие ЦОС вошла в состав стандартных дисциплин базовых университетских курсов. Сегодня ЦОС стала неотъемлемой частью базовых навыков, необходимых учёным и инженерам многих специальностей. Цифровую обработку сигналов можно сравнить с *электроникой*, которая совершила предыдущую техническую революцию. И в наши дни главенство электроники продолжается, т. к. почти каждый учёный и инженер обладает хотя бы начальными знаниями по разработке электрических схем. Без этих знаний они бы просто потерялись в современном техническом мире. Цифровой обработке сигналов предстоит такое же будущее.

Эта история не просто любопытна, она должна стать хорошим импульсом к изучению и использованию методов ЦОС. Допустим, вы столкнулись с какой-то трудностью в использовании цифровой обработки сигналов и в поисках решения обращаетесь к учебникам или другим публикациям. Обычно в этих пособиях можно найти целые страницы уравнений, непонятных математических символов и незнакомой терминологии. Это просто кошмар! Большая часть литературы по ЦОС тяжело воспринимается даже теми людьми, у которых есть опыт работы в данной сфере. Не то чтобы это плохой материал, просто он рассчитан на очень узкоспециализированную аудиторию. Такого рода подробная математика нужна современным исследователям для постижения теоретических результатов работы.

Основной идеей создания этой книги явилось то, что большинство методов ЦОС может быть изучено и в дальнейшем использовано без привлечения традиционного аппарата математической теории, становящегося барьером на пути инженера и исследователя. Эта книга написана для тех, кто желает использовать ЦОС в качестве *инструмента*, а не для тех, кто хочет *сделать научную карьеру* в этой области.



Рис. 1.2. Цифровая обработка сигналов имеет весьма размытые границы со многими смежными направлениями науки и техники, а также математикой.

Далее в этой главе рассматриваются те области науки и техники, в которых ЦОС произвела поистине революционные изменения. По мере перехода от одной сферы применения к другой вы можете заметить, что цифровая обработка сигналов является междисциплинарной, поскольку основана на теоретической базе многих смежных областей. Кроме того, как показано на **Рис. 1.2**, границы между ЦОС и другими техническими дисциплинами определены не чётко. Они довольно размыты и обуславливают взаимное проникновение дисциплин друг в друга. Если вы хотите специализироваться в ЦОС, вам придётся изучить и смежные дисциплины.

1.2. Связь

Связь представляет собой раздел науки и техники, посвящённый передаче информации на расстояние. Передаваться могут самые разные виды информации: телефонные разговоры, телевизионные сигналы, компьютерные файлы и другие типы данных. Для осуществления передачи информации необходимо организовать *канал* связи. Это может быть пара проводов, радиоканал, оптоволокно и т. д. Телекоммуникационные компании взимают плату за передачу информации со своих клиентов, и в то же время они должны сами оплачивать установку и поддержание каналов. Финансовая выгода очевидна: чем больше информации они смогут пропустить через один канал, тем больше денег заработают. ЦОС вызвала настоящую революцию в сфере телекоммуникационной индустрии. Новый уровень производительности и функциональности был достигнут в таких областях, как генерация и детектирование тональных сигналов, сдвиг частотных диапазонов, фильтрация шумов источника питания и многих других. Далее мы рассмотрим три примера применения ЦОС в телефонии: мультиплексирование, сжатие и эхоподавление.

1.2.1. Мультиплексирование

В мире насчитывается примерно 1 миллиард телефонов. Всего через несколько секунд после нажатия нескольких кнопок коммутационная схема позволяет соединить любой из этих аппаратов с любым другим. Сложность этой задачи просто поражает! До 1960-х годов соединение между двумя телефонами требовало прохождения аналогового звукового сигнала через механические переключатели и усилители. Для одного соединения необходимо было задействовать одну пару проводов. В современных системах цифровая обработка сигналов преобразует аудиосигналы в последовательный поток цифровых данных. Поскольку биты могут довольно легко объединяться в один поток и затем также легко разделяться, то по одному каналу можно передавать несколько телефонных разговоров. Например, телефонный стандарт под названием *T-carrier system (24-канальная ИКМ-система типа T)* позволяет передавать одновременно до 24 голосовых сигналов. Каждый речевой сигнал подвергается дискретизации со скоростью 8000 отсчётов в секунду посредством 8-битного компандированного (с логарифмическим сжатием) аналогово-цифрового преобразования. В результате каждый голосовой сигнал

преобразуется в поток данных со скоростью передачи 64000 бит/с, а все 24 канала передают данные со скоростью 1.544 Мбит/с. Этот сигнал передаётся через обычный медный телефонный кабель с сечением стандарта AWG22 на расстояние около 1800 метров, что является типичной величиной для соединения типа точка—точка. В результате цифровая передача приносит огромную финансовую выгоду, позволяя заменить дорогие кабели и аналоговые коммутирующие устройства на дешёвые цифровые логические схемы.

1.2.2. Сжатие

При дискретизации голосового сигнала со скоростью 8000 отсчётов в секунду большая часть цифровой информации является *избыточной*. Происходит это потому, что информация, передаваемая одним отсчётом, в значительной степени дублируется соседними отсчётами. Для преобразования цифрового речевого сигнала в поток данных с минимальным отношением бит/с разработано большое количество алгоритмов ЦОС, которые называют *алгоритмами сжатия*. Для последующего получения сигнала в его первоначальном виде используются соответствующие *алгоритмы восстановления*. Алгоритмы различаются между собой степенью сжатия данных и качеством звука после восстановления. В общем случае уменьшение скорости передачи данных с 64 до 32 Кбит/с не приводит к ухудшению качества звука. При сжатии до скорости передачи 8 Кбит/с звук заметно меняется, но всё же годится для использования, например, в телефонных сетях дальней связи. При самой высокой степени сжатия скорость потока уменьшается до 2 Кбит/с, в результате чего звук сильно искажается, но всё же находит, например, применение в некоторых военных приложениях или для связи под водой.

1.2.3. Эхоподавление

Эхо-сигналы представляют собой серьёзную проблему в телефонных соединениях дальней связи. Когда вы говорите по телефону, сигнал, представляющий ваш голос, передаётся к приёмнику, от которого часть этого сигнала возвращается в виде эха. Если длина соединения не превышает нескольких сот километров, то время прихода эхо-сигнала составляет всего несколько миллисекунд. Человеческое ухо адаптировано к восприятию эха с таким малым временем задержки, поэтому качество звука не ухудшается. С увеличением расстояния эхо становится всё более заметным и вызывает неудобство. В случае межконтинентальной связи задержка может достигать нескольких сот миллисекунд, что весьма нежелательно. Системы с цифровой обработкой сигналов решают эту проблему с помощью измерения отражённого сигнала и генерирования соответствующего «*антисигнала*» для подавления эха. Этот же принцип позволяет использовать «громкую связь» одновременно для прослушивания и передачи голоса без аудиоэффекта обратной связи (свиста). Этот метод можно также использовать и для уменьшения уровня окружающих шумов с помощью цифровой генерации сигнала «*антишума*».

1.3. Обработка звуковых сигналов

Слух, наряду со зрением, является основным чувством восприятия человека. Поэтому неудивительно, что значительная часть ЦОС-систем ориентирована на *обработку звуковых сигналов*. Воспринимаемую на слух информацию можно разделить на *музыку и речь*. В обоих этих направлениях цифровая обработка сигналов произвела революционные изменения.

1.3.1. Музыка

Путь, ведущий от микрофона музыканта к колонкам меломана, долог и тернист. Цифровая обработка позволяет предотвратить возникающие на этом пути искажения сигнала, в основном связанные с использованием аналоговых устройств преобразования и хранения звукового сигнала. Результат знаком любому, кто сравнивал качество музыки, воспроизводимой с аудиокассет и с компакт-дисков. Как правило, в музыкальной студии музыкальные произведения записываются по нескольким каналам или дорожкам. Иногда производится отдельная запись отдельных инструментов и солистов, чтобы дать звукоинженеру больше возможностей для создания конечного продукта. Сложный процесс объединения звуков отдельных дорожек в окончательный вариант записи музыкального произведения называется *микшированием (или сведением фонограмм)*. В этом процессе ЦОС может выполнять несколько важных функций, в том числе фильтрацию, суммирование и вычитание сигналов, монтаж и др.

Одним из самых интересных применений ЦОС в процессе создания записи музыкального произведения является *искусственная реверберация*. Если просто сложить вместе звуки отдельных каналов, то полученный таким образом музыкальный фрагмент будет звучать вяло и неярко, как если бы музыканты играли на улице. Это связано с тем, что на слушателей большое впечатление оказывает эхо, или реверберация в музыкальном произведении, которая обычно минимальна в условиях звуковой студии. Применение ЦОС в процессе смешивания звуковых дорожек позволяет добавлять искусственное эхо и имитировать различные условия для прослушивания музыки. Эхо с задержкой в несколько сот миллисекунд позволяет получить звучание, аналогичное тому, какое можно услышать в кафедральном соборе. Добавление эхо-сигналов с задержкой в 10...20 миллисекунд даёт ощущение прослушивания музыки в помещении более скромных размеров.

1.3.2. Синтез речи

Синтез и распознавание речи применяются для осуществления связи между людьми и машинами. Вместо рук и глаз вы можете использовать рот и уши. Это очень удобно, когда ваши руки и глаза заняты чем-либо другим, например вождением автомобиля, проведением хирургической операции или стрельбой. Для компьютерного синтеза речи используются два метода: *цифровая запись* и *эмуляция речевого тракта*. При цифровой записи человеческий голос оцифровывается и хранится в памяти компьютера обычно в сжатом виде. Во время воспроизведения цифровые данные распаковываются и преобразовываются обратно в аналоговый сигнал. Для хранения записи речи длительностью один час потребуется

около 3 МБ памяти, что является весьма хорошим показателем даже для небольших компьютерных систем. Этот метод на сегодняшний день является наиболее распространённым в системах синтеза речи.

Эмуляция речевого тракта является более сложным методом, при котором имитируются физические механизмы, с помощью которых люди разговаривают. Человеческий речевой тракт представляет собой акустический резонатор с определёнными резонансными частотами, величина которых определяется размерами и формой его полостей. Звук в речевом тракте формируется одним из двух основных способов, соответствующих образованию двух типов звуков: вокализованных и фрикативных. При образовании вокализованных звуков вибрация голосовых связок производит в полостях речевого тракта колебания воздуха, близкие к периодическим. Фрикативные звуки образуются при прохождении воздушного потока через тонкие щели, образованные, например, губами и зубами. Эмуляция речевого тракта с помощью цифровой обработки сигналов подразумевает имитацию двух рассмотренных способов формирования звука. Характеристики резонансной полости эмулируются при помощи прохождения возбуждающих сигналов через цифровой фильтр с подобными резонансными характеристиками. Такой метод успешно использовался на раннем этапе развития ЦОС в популярном электронном учебном пособии для детей «Speak & Spell».

1.3.3. Распознавание речи

Автоматическое распознавание человеческой речи является существенно более сложным процессом, чем синтез. Распознавание речи — классический пример задачи, с которой легко справляется человеческий мозг, а самый современный цифровой компьютер часто оказывается бессильным. Компьютеры могут хранить и воспроизводить огромное количество данных, за считанные мгновения выполнять математические вычисления, эффективно и без усталости производить повторяющиеся операции. Но, к сожалению, современные компьютеры очень плохо справляются с работой, связанной с обработкой данных реального мира, поступающих непосредственно с датчиков. Довольно легко заставить компьютер ежемесячно присылать вам счёт за электроэнергию, но научить его понимать вашу речь — задача куда более сложная.

Цифровая обработка сигналов обычно решает задачу распознавания речи в два этапа: *выделение особенностей* и *сопоставление особенностей*. Каждое слово в принимаемом аудиосигнале выделяется отдельно, а затем анализируется для определения типа возбуждений, которые присутствуют в нём, а также значений резонансных частот. Затем обнаруженные параметры сравниваются с ранее сохранёнными примерами произнесённых слов для поиска наилучшего соответствия. Часто в таких системах словарный запас ограничен несколькими сотнями слов, они могут воспринимать речь с обязательными чёткими паузами между словами и должны настраиваться на каждого индивидуального пользователя. Эти ограничения пока вполне подходят для многих коммерческих приложений, но если эти ограничения сравнить с возможностями человека, то компьютер будет выглядеть достаточно бледно. В этой сфере ещё многое предстоит сделать, и того, кто сумеет создать успешный коммерческий продукт, ждёт огромная финансовая прибыль.

1.4. Эхолокация

Для получения информации об удалённом объекте наиболее часто используется эффект отражения волн. Например, радиолокационная станция излучает импульсы радиоволн в окружающее воздушное пространство и затем принимает сигналы, отражённые от находящихся в воздухе объектов (самолетов). В гидролокации звуковые волны излучаются в толщу воды для обнаружения подводных лодок и других объектов. Долгое время геологи исследовали землю, формируя на поверхности взрыв и регистрируя эхо-сигналы, отражённые от глубоко лежащих слоёв породы. Несмотря на то что все эти приложения используют общие принципы, для каждого из них характерны свои специфические проблемы и требования. Цифровая обработка сигналов широко и весьма эффективно применяется во всех трёх указанных направлениях.

1.4.1. Радиолокация

В английском языке для обозначения радиолокационного устройства используется слово «radar» (радар). Это слово является аббревиатурой словосочетания *Radio Detection And Ranging* (*Радиообнаружение и измерение расстояния*). В простейшей радиолокационной системе передатчик формирует радиоимпульс длительностью несколько микросекунд. Этот импульс поступает в узконаправленную антенну, излучающую соответствующую радиоволну в пространство, где она распространяется со скоростью света. Самолёт, находящийся на пути распространения радиоволны, отражает некоторую часть падающего на него излучения обратно на приёмную антенну, расположенную вблизи передатчика или совмещённую с ним. В таком случае расстояние до объекта можно будет определить по времени, прошедшем от момента излучения импульса до момента регистрации эхо-сигнала. Направление на объект определяется по положению узконаправленной антенны в момент приёма эхо-сигнала.

Рабочая дальность радиолокационной системы определяется двумя параметрами: энергией излучаемого (зондирующего) импульса и уровнем шума радиоприёмника. К сожалению, увеличение энергии импульса обычно требует *увеличения длительности* импульса, а с другой стороны, импульсы большей длительности приводят к снижению точности измерения временного интервала. В результате наступает противоречие между двумя важными параметрами: способностью обнаруживать объекты на большом удалении и точностью определения расстояния до них.

ЦОС произвела революционные изменения в трёх направлениях решения этой проблемы. Во-первых, ЦОС-системы могут сжимать принимаемый импульс, обеспечивая высокое разрешение по дальности (точность измерения расстояния) без уменьшения рабочего диапазона системы. Во-вторых, ЦОС может производить фильтрацию принимаемого сигнала для уменьшения уровня шумов, что способствует увеличению рабочей дальности без ухудшения точности определения расстояния. В-третьих, ЦОС позволяет производить быстрый выбор и генерацию зондирующих импульсов различной формы и длительности, что обеспечивает оптимизацию параметров импульса в каждой конкретной ситуации. А

теперь самое удивительное: многие из этих операций осуществляются на частоте дискретизации, сравнимой с используемой радиочастотой и составляющей несколько сот мегагерц!

1.4.2. Гидролокация

Гидролокация в английском языке обозначается словом «*sonar*», которое образовано от слов *SOUND NAVIGATION AND RANGING* (*звуконавигация и измерение расстояний*). Различают *активную* и *пассивную* гидролокацию. При активной гидролокации звуковые импульсы частотой 2...40 кГц излучаются в толщу воды, после чего отражённые эхо-сигналы обнаруживаются и анализируются. Активную гидролокацию используют для обнаружения и определения местоположения подводных тел, навигации, связи и составления карт морского дна. Типичная максимальная рабочая дальность таких систем — 10...100 км. Пассивная гидролокация представляет собой обычное прослушивание подводных звуков, которые включают в себя естественную турбулентность, морскую жизнь, механические звуки подводных лодок и надводных судов. Поскольку при пассивной гидролокации не происходит излучения энергии, то она идеальна для проведения секретных операций, т. е. тогда, когда вы хотите обнаружить другого «парня» и чтобы при этом этот «парень» не обнаружил вас. Самое широкое применение пассивная гидролокация нашла в системах наблюдения военного назначения, предназначенных для обнаружения и отслеживания передвижения подводных лодок. Обычно в пассивной гидролокации применяются более низкие частоты, чем в активной гидролокации, так как звуковые волны проходят через толщу воды с меньшим поглощением. Дальность обнаружения при этом может достигать тысяч километров.

Так же как и в радиолокации, в гидролокации ЦОС произвела коренные изменения во многих сферах: при генерации импульсов, сжатии импульсов и обнаружении сигналов. На первый взгляд гидролокация должна быть проще, чем радиолокация, так как в ней используются более низкие частоты. В то же время гидролокация сложнее радиолокации, так как среда распространения сигнала в ней неоднородна и нестабильна. Гидролокационные системы обычно не являются одноканальными, а используют многоэлементные передающие и принимающие антенные решётки. С помощью управления и смешивания сигналов такая многоэлементная гидролокационная система способна излучать импульс в заданном направлении или регистрировать отражения с нужного курса. Для управления такой многоканальной системой гидролокатор требует применения не менее мощных методов ЦОС, чем радиолокатор.

1.4.3. Сейсморазведка методом отражённых волн

Ещё в начале 1920-х годов геофизики обнаружили, что структуру земной коры можно исследовать с помощью звука. Исследователи производили подрыв взрывного устройства и записывали эхо-сигналы, отражённые от граничных слоёв, находящихся на расстоянии более десяти километров ниже поверхности земли. Полученные эхо-сейсмограммы использовались для составления примерных карт структуры приповерхностной области земли. Впоследствии сейсмический метод

отражения стал основным при разведке месторождений нефти и других полезных ископаемых и остаётся таким по сей день.

В идеальном случае направленный в толщу земли звуковой импульс произведёт один эхо-сигнал на каждый пройденный им граничный слой. К сожалению, на практике обычно не всё так просто. Каждый возвращающийся на поверхность эхо-сигнал должен пройти сквозь другие слои, которые находятся выше места его возникновения. В результате может появиться эхо-сигнал, который отразится между слоями и спровоцирует возникновение другого эхо-сигнала от эхо-сигнала, который также будет обнаружен на поверхности. Из-за таких вторичных эхо-сигналов принимаемый сигнал может стать очень сложным и трудным для интерпретации. Поэтому начиная с 1960-х годов для отделения первичных и вторичных эхо-сигналов при составлении сейсмограмм с записью отражённых волн широко используется цифровая обработка сигналов. Как же обходились первые геофизики без ЦОС? Ответ довольно прост: они вели наблюдение в тех районах земли, где многочисленные переотражения сигналов были минимальны. ЦОС позволяет находить нефть в труднодоступных местах, например под толщей океана.

1.5. Обработка изображений

Изображения — это особый класс сигналов. Во-первых, они характеризуются изменением некоторого параметра в пространстве (зависимостью от расстояния), в то время как большинство сигналов описывается изменением параметра во времени (зависимостью от времени). Во-вторых, объём содержащейся в них информации очень велик. Например, для хранения одной секунды телевизионного сигнала может потребоваться более 10 МБ. Это более чем в 1000 раз превышает требования хранения речевого сигнала такой же длительности. В-третьих, часто при оценке качества изображения субъективное человеческое мнение одерживает верх над объективными критериями. Данные специфические признаки выделяют сферу обработки изображений в отдельную область ЦОС.

1.5.1. Изображения в медицине

В 1895 году Вильгельм Конрад Рентген обнаружил, что рентгеновские лучи способны проходить сквозь материю. Возможность заглянуть внутрь живого человеческого тела произвела революционные изменения в медицине. Всего за несколько лет медицинские рентгеновские системы распространились по всему миру. Несмотря на явный успех, до появления в 1970-х годах ЦОС и других смежных технологий развитие медицинской рентгенографии было ограничено четырьмя проблемами. Во-первых, перекрывающиеся структуры в теле человека могут быть скрыты друг за другом. Например, часть сердца может быть невидима за рёбрами. Во-вторых, не всегда можно определить различие между похожими тканями. Например, отличить кость от мягкой ткани ещё возможно, но довольно трудно отличить опухоль от печени. В-третьих, рентгеновские снимки передают *анатомию* (строение тела), а не *физиологию* (его функционирование). Рентгеновский снимок живого человека выглядит абсолютно так же, как рентгеновский снимок

мёртвого. В-четвёртых, воздействие рентгеновских лучей может вызвать рак, поэтому их использование ограничено.

Проблема перекрывающихся структур была решена в 1971 году с появлением *компьютерной томографии* (раньше называлась *компьютерной осевой томографией*). Компьютерная томография представляет собой классический пример применения цифровой обработки сигналов. С большого количества направлений рентгеновские лучи пропускаются сквозь зондируемый участок тела пациента. Вместо того чтобы просто формировать изображение с помощью принятых рентгеновских лучей, эти сигналы преобразуются в цифровую форму и сохраняются в компьютере. Затем эта информация используется для расчёта и формирования послойных изображений структуры человеческого тела. Полученные изображения намного подробнее тех, что получаются с помощью обычных технологий, и позволяют значительно улучшить диагностику и лечение больного. Появление компьютерной томографии было таким же грандиозным событием, как в своё время открытие рентгеновских лучей. Всего через несколько лет каждая крупная клиника мира имела доступ к компьютерному томографу. В 1979 году два основных изобретателя компьютерной томографии — Годфри Хоунсфильд и Аллан Кормак получили Нобелевскую премию в области медицины. *Это замечательный пример использования ЦОС!*

Последние три проблемы использования рентгеновских лучей были решены с помощью применения радио- и звуковых волн. ЦОС играет ключевую роль во всех этих методах. Например, в магнитно-резонансной томографии для зондирования внутренностей человеческого тела используются магнитные поля в сочетании с радиоволнами. Воздействие полей определённой силы и частоты вызывает резонанс квантовых энергетических состояний атомных ядер локального участка человеческой ткани. В результате резонанса излучается вторичная радиоволна, которая детектируется антенной, расположенной возле обследуемого участка тела. Величина и другие характеристики принятого сигнала несут информацию об исследуемом участке, подвергаемом резонансу. Регулируя параметры магнитного поля, можно просканировать всё тело, отображая таким образом внутреннюю его структуру. Обычно эта информация представляется в виде изображения, как в компьютерной томографии. Магнитно-резонансная томография передаёт информацию не только о различиях между разными типами мягкой ткани, но также и о физиологии, например о токе крови по артериям. Магнитно-резонансная томография полностью основана на методах цифровой обработки сигналов и не может быть реализована без их использования.

1.5.2. Изображения, получаемые в космосе

Иногда возникает необходимость по возможности максимально улучшить качество фотографического снимка. Довольно часто снимки невысокого качества получаются при фотографировании с автоматических спутников и космических исследовательских станций. Никто не будет отправлять на Марс ремонтную группу только лишь для того, чтобы отрегулировать камеру, нажав на пару кнопок! С помощью ЦОС можно улучшить качество изображений, полученных в крайне неблагоприятных условиях, несколькими способами: регулировкой яркости и контрастности, подчёркиванием границ, подавлением шума, регулировкой фоку-

сировки, уменьшением размытости изображения движущегося объекта и т. д. Могут быть скорректированы изображения с пространственными искажениями, например теми, которые получаются в результате отображения сферических поверхностей (планет) на плоскости. Изображения могут быть помещены в отдельную базу данных, что позволяет отображать информацию различными способами. Например, с помощью воспроизведения видеокладов можно смоделировать полёт летательного аппарата над поверхностью далёкой планеты.

1.5.3. Коммерческие продукты

Огромные объёмы информации, которые содержат изображения, представляют собой серьёзную проблему для коммерческих продуктов, ориентированных на широкие круги пользователей. Коммерческие системы должны быть дешёвы, что плохо сочетается с требуемыми большими объёмами памяти и высокими скоростями передачи данных. Одним из путей решения данной проблемы является сжатие изображений. Как и в случае со звуковыми сигналами, изображения содержат большое количество избыточной информации. Применяв специальные алгоритмы сжатия информации, можно уменьшить количество битов, необходимых для представления изображения. Для сжатия особенно подходят телевизионные и другие изображения, так как большая часть информации в них переходит из одного кадра в другой без изменений. Подобная технология эффективно применяется в таких коммерческих видеосистемах, как видеотелефоны, компьютерные программы, использующие видеоданные, цифровое телевидение.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА И СЛУЧАЙНЫЕ СИГНАЛЫ

Математическая статистика и теория вероятностей используются в ЦОС для описания сигналов и процессов. Почему это необходимо? При решении задач цифровой обработки практически всегда возникает необходимость уменьшения различного рода помех, шумов или каких-либо иных нежелательных компонентов в регистрируемом сигнале. Эти компоненты могут являться неотъемлемой частью самого входного сигнала, возникая, например, из-за несовершенной работы системы сбора данных, или появляться как нежелательный побочный эффект в процессе выполнения одной из ЦОС-операций. Статистика и теория вероятностей позволяют измерять и классифицировать эти нежелательные компоненты, что является первым необходимым шагом на пути их устранения. В этой главе описаны наиболее важные статистические и вероятностные концепции с акцентом на то, какую практическую роль они играют в обработке регистрируемых сигналов.

2.1. Сигналы и их графическое отображение

Сигналом называется процесс изменения состояния некоторого объекта, служащий для отображения и передачи информации. Сигналы выражаются зависимостью одной величины от другой. Например, в аналоговой электронике наиболее типичным примером сигнала может служить изменение во времени уровня электрического напряжения. Поскольку обеим этим величинам (напряжению и времени) свойственна непрерывность принимаемых значений, такой сигнал называется *непрерывным*, или *аналоговым*. При прохождении непрерывного сигнала через аналого-цифровой преобразователь обе эти величины подвергнутся *квантованию*. Пусть, например, выполняется аналого-цифровое преобразование с 12-битной точностью и частотой выборки 1000 отсчетов в секунду. В этом случае диапазон значений напряжения будет ограничен 4096-ю (2^{12}) возможными двоичными уровнями, а время сможет увеличиваться только на величину фиксированного шага, равного одной миллисекунде. Сигналы, сформированные в результате такой процедуры квантования по двум величинам одновременно, называют *цифровыми сигналами*. Как правило, аналоговые сигналы существуют в природе, в то время как цифровые сигналы способны существовать только внутри вычислительных машин (заметим, что для обоих случаев есть исключения). Встречаются также сигналы, у которых один параметр изменяется непрерывно, а второй — дискретно. Например, сигнал является *дискретным*, если он может принимать непрерывный ряд значений при дискретных значениях аргумента. Поэто-

му для точного определения типа сигнала необходимо детальное изучение природы описывающих его величин.

На **Рис. 2.1** показаны примеры сигналов на входе цифровой системы. По вертикальной оси могут откладываться такие величины, как напряжение, интенсивность излучения, звуковое давление или любой другой параметр. В данном случае мы воспользуемся общим названием — *амплитуда*. Часто для обозначения этой величины используются и другие названия: *ось Y, зависимая переменная, множество значений, ось ординат*.

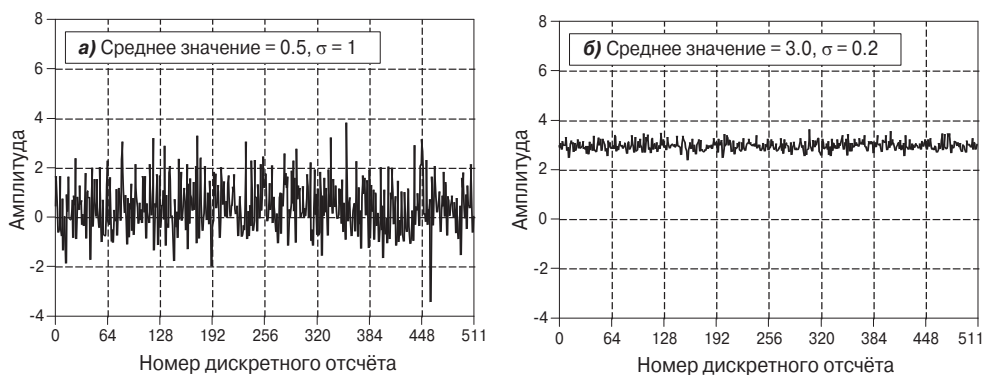


Рис. 2.1. Пример двух сигналов, принимаемых цифровой системой, имеющих различные средние значения и среднеквадратические отклонения.

По горизонтальной оси откладывается вторая величина, представляющая сигнал. Для её обозначения в общем случае также может использоваться ряд терминов: *ось X, независимая переменная, область определения* или *абсцисса*. Для сигналов, принимаемых системой обработки, наиболее распространённой величиной, откладываемой по горизонтальной оси, является время. В некоторых приложениях, однако, могут использоваться и другие параметры. Например, геофизики измеряют плотность породы через одинаковые расстояния вдоль поверхности земли. В этом случае по горизонтальной оси могут откладываться метры или километры. Чтобы сохранить общность суждений, по горизонтальной оси мы будем откладывать *номера дискретных отсчётов*. Это применимо, однако, только для дискретных сигналов. Если бы на **Рис. 2.1** был изображён аналоговый сигнал, то для обозначения горизонтальной оси нужно было бы использовать иные величины, например, время, расстояние, x и т. д.

Две величины, участвующие в описании сигнала, в общем случае не являются равнозначными. Величина, отложенная по оси Y (зависимая переменная), представляет собой *функцию* величины, отложенной по оси X (независимой переменной). Другими словами, независимая переменная показывает, *когда, в какой момент времени* производится выборка каждого следующего отсчёта, а зависимая переменная несёт информацию о значении сигнала в момент выборки. Для каждого значения на оси X мы всегда можем найти соответствующее значение на оси Y , но, как правило, не наоборот.

Обратим особое внимание на термин «область определения», который широко используется в ЦОС. Например, сигнал, который в качестве независимой пе-