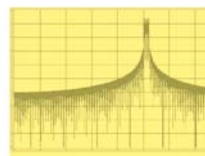
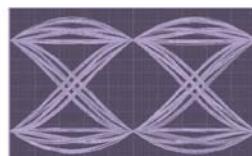
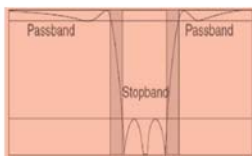
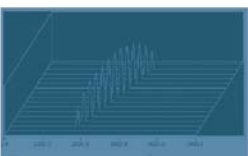
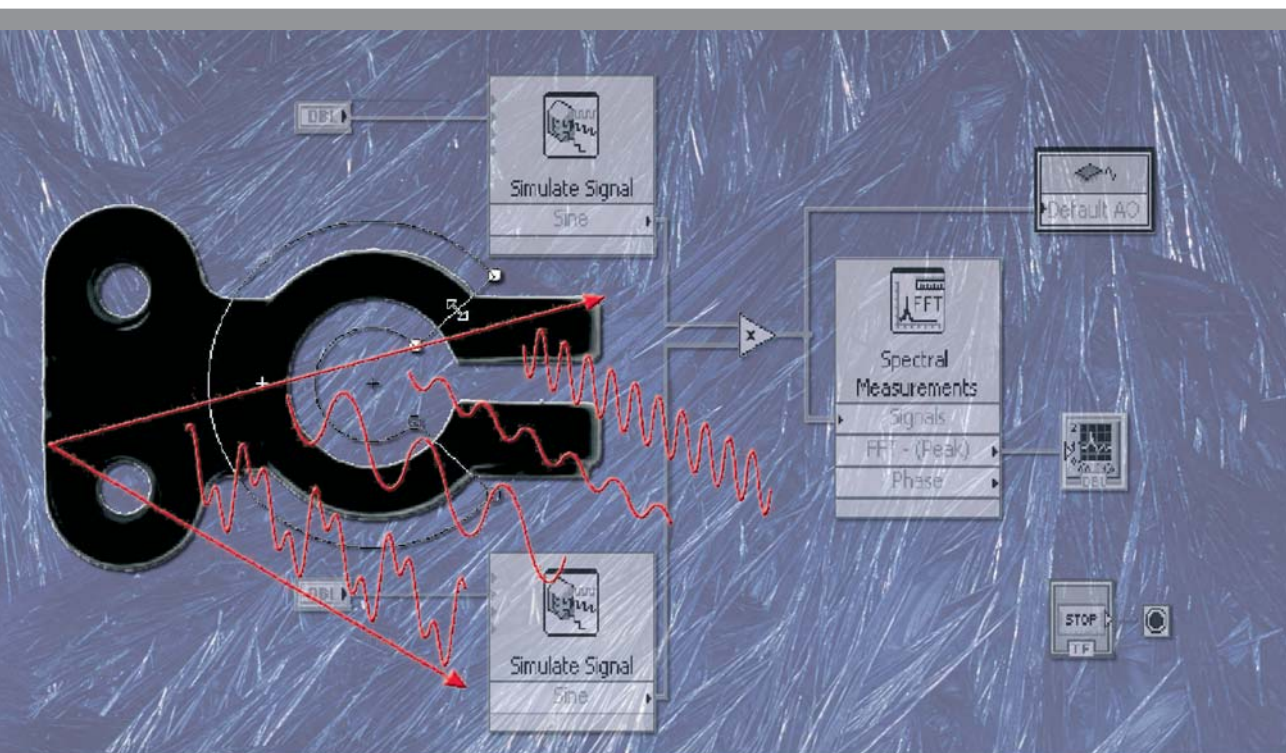


# Цифровая обработка сигналов в LabVIEW



Федосов В. П.  
Нестеренко А. К.

**УДК 681.3.06(075.8)**  
**ББК 32.973.26-108.2\*\*\***  
**Б 28\*\*\***

*Рецензенты:*

кафедра «Радиоэлектронные системы» Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса, г. Шахты Ростовской области, заведующий кафедрой, канд. техн. наук, профессор **Марчук В. И.**;

доктор техн. наук, профессор кафедры радиофизики Волгоградского государственного университета **Захарченко В. Д.**

**Федосов В. П., Нестеренко А. К.**

Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В. П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

**ISBN 5-94074-342-0**

Учебное пособие содержит материалы для освоения программно-аппаратных средств National Instruments по спектральному анализу, применению окон сглаживания, узлов цифровых систем связи, синтезу и анализу цифровых фильтров, программированию и тестированию сигнальных процессоров, программированию ПЛИС, виброакустическому анализу, проектированию цифровых фильтров, сопряжению LabVIEW с другими программными средствами для цифровой обработки сигналов. Пособие предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и специалистов, изучивших начальный курс LabVIEW.

**УДК 681.3.06(075.8)**  
**ББК 32.973.26-108.2\***

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 5-94074-342-0

© Федосов В. П., Нестеренко А. К., 2007  
© Оформление, ДМК Пресс, 2007



<b>Предисловие</b> .....	16
--------------------------	----

## ▼ 1

<b>Введение в цифровую обработку сигнала и анализ в LabVIEW</b> .....	18
---	----

## ▼ 2

<b>Цифровая связь и LabVIEW</b> .....	27
2.1. Обычный цифровой приемник .....	30
2.2. Приемник подвыборки .....	31
Резюме .....	36

## ▼ 3

<b>Получение сигнала в LabVIEW</b> .....	38
3.1. Сигнал в обычном цифровом приемнике .....	38
3.2. Сигнал в цифровом приемнике с прореживанием выборки .....	43
3.2.1. Выбор частоты дискретизации .....	45
3.2.2. ОСШ при прореживании выборки .....	46
3.2.3. Прореживание выборки и спектральное размещение сигнала .....	53
3.3. Другие методы дискретизации .....	54
3.3.1. Цифровой осциллограф .....	55
3.3.2. Анализатор спектра радиосигнала .....	55
3.3.3. Карта дискретизации аналогового сигнала .....	56
3.3.4. Звуковая карта .....	56
Резюме .....	57

## ▼ 4

<b>Цифровая фильтрация(Digital Filtering)</b> .....	60
4.1. Введение в фильтрацию .....	60
4.2. Преимущества цифровой фильтрации по сравнению с аналоговой фильтрацией .....	60

4.3. Классификация цифровых фильтров .....	61
4.3.1. Импульсная характеристика (Impulse Response) .....	61
4.3.2. Классификация фильтров по импульсной характеристике .....	62
4.3.3. Коэффициенты фильтра .....	63
4.3.4. Характеристики идеальных фильтров .....	63
4.3.5. Практические (неидеальные) фильтры .....	65
4.3.6. Полоса перехода .....	65
4.4. Пульсации АЧХ в полосе пропускания и в полосе ослабления .....	65
4.5. Частота дискретизации .....	67
4.6. КИХ-фильтры .....	67
4.6.1. Отводы (Taps) .....	68
4.6.2. Проектирование КИХ-фильтров .....	68
4.6.3. Проектирование КИХ-фильтров с помощью окон (Windowing) .....	72
4.6.4. Проектирование оптимальных КИХ-фильтров на основе использования алгоритма Parks-McClellan .....	73
4.6.5. Проектирование Equiripple КИХ-фильтров на основе использования алгоритма Parks-McClellan .....	73
4.6.6. Проектирование узкополосных КИХ-фильтров .....	74
4.6.7. Проектирование широкополосных КИХ-фильтров .....	76
4.7. БИХ(IIR)-фильтры .....	77
4.7.1. Каскадная форма БИХ-фильтрации .....	78
4.7.2. Фильтрация второго порядка .....	79
4.7.3. Фильтрация четвертого порядка .....	80
4.7.5. Типы БИХ-фильтров .....	81
4.7.6. Минимизация пиковой ошибки .....	81
4.7.7. Фильтры Баттерворта (Butterworth) .....	81
4.7.8. Фильтры Чебышева .....	82
4.7.9. Фильтры Чебышева II .....	82
4.7.10. Эллиптические фильтры .....	84
4.7.11. Фильтры Бесселя .....	85
4.7.12. Проектирование БИХ-фильтров .....	85
4.7.13. Характеристики БИХ-фильтра в LabVIEW .....	87
4.7.14. Переходный отклик .....	88
4.8. Сравнение КИХ- и БИХ-фильтров .....	88
4.9. Нелинейные фильтры .....	89
4.10. Выбор проекта цифрового фильтра .....	91

## ▼ 5

<b>Спектральный анализ</b> .....	93
5.1. Различия между частотной областью и временной областью .....	93
5.2. Отношения Парсеваля .....	95

---

5.3. Преобразование Фурье .....	95
5.4. Дискретное преобразование Фурье .....	97
5.4.1. Отношения между выборками из N отсчетов в области частот и в области времени .....	97
5.4.2. Пример ДПФ .....	98
5.4.3. Информация об амплитуде и фазе .....	100
5.4.4. Частотный интервал между выборками ДПФ .....	101
5.5. Основные принципы БПФ .....	103
5.5.1. Вычисление частотных составляющих .....	104
5.5.2. Быстродействие БПФ .....	104
5.5.3. Дополнение нулями .....	105
5.5.4. Виртуальный прибор БПФ (VI FFT) .....	106
5.5.5. Отображение частотной информации после преобразования .....	106
5.5.6. Двухстороннее БПФ, центрированное относительно постоянной составляющей .....	108
5.5.7. Математическое представление двустороннего БПФ, центрированного относительно постоянной составляющей .....	108
5.5.8. Создание двустороннего БПФ с постоянной составляющей в центре .....	109
5.6. Спектр мощности .....	111
5.6.1. Преобразование двустороннего спектра мощности в односторонний спектр мощности .....	112
5.6.2. Потеря фазовой информации .....	113
5.6.3. Вычисления на основе спектра .....	114
5.6.4. Оценка мощности и частоты .....	114
5.6.5. Вычисление шумового уровня и спектральная плотность мощности .....	115
5.6.6. Вычисление амплитудных и фазовых спектров .....	116
5.6.7. Вычисление амплитуды в вольтах среднеквадратических значений ( $V_{rms}$ ) и начальной фазы в градусах .....	118
5.6.8. Частотная характеристика .....	118
5.7. Перекрестный (взаимный) спектр мощности (Cross Power Spectrum) .....	119
5.7.1. Частотная характеристика и анализ четырехполюсников .....	120
5.7.2. Частотная характеристика .....	120
5.7.3. Импульсная характеристика .....	121
5.8. Функция когерентности .....	121
5.9. Работа с окнами .....	122
5.10. Усреднение для улучшения измерений .....	123
5.10.1. Среднеквадратическое усреднение (RMS Averaging) .....	123
5.10.2. Векторное усреднение (Vector Averaging) .....	124
5.10.3. Пиковое усреднение (Peak Hold) .....	124

5.11. Взвешивание (Weighting) .....	124
5.12. Обнаружение эхосигнала (Echo Detection).....	125

## ▼ 6

<b>Примеры спектрального анализа в LabVIEW</b> .....	128
6.1. Преобразования низкого уровня в области частоты .....	128
6.1.1. Простое БПФ .....	130
6.1.2. Улучшенное БПФ .....	132
6.2. Анализ результатов ДПФ .....	135
6.2.1. Спектральная утечка .....	135
6.2.2. Дискретизация формы окна .....	135
6.3. Спектральные преобразования высокого уровня .....	140
6.4. Добавление обычных кодов C к LabVIEW .....	143
6.5. Инструменты (Toolset) для спектральных измерений .....	147
Резюме .....	148

## ▼ 7

<b>Окна сглаживания (Smoothing windows)</b> .....	149
7.1. Растекание спектра .....	149
7.1.1. Дискретизация целого числа периодов .....	151
7.1.2. Дискретизация с нецелым числом периодов .....	152
7.2. Сигналы с окнами .....	154
7.3. Характеристики сигналов с различными окнами сглаживания .....	158
7.3.1. Основной лепесток спектра окна сглаживания .....	159
7.3.2. Боковые лепестки спектра окна сглаживания .....	160
7.4. Прямоугольное окно (None) .....	161
7.5. Окно Хэннинга (Hanning) .....	161
7.6. Окно Хемминга (Hamming) .....	162
7.7. Окно Кайзера – Бесселя (Kaiser – Bessel) .....	163
7.8. Треугольное окно (Triangle) .....	164
7.9. Окно с плоской вершиной (Flat Top) .....	164
7.10. Экспоненциальное (Exponential) окно .....	165
7.11. Окно для спектрального анализа против окна для проектирования коэффициентов фильтра .....	166
7.11.1. Спектральный анализ .....	166
7.11.2. Окна для проектирования коэффициентов КИХ-фильтра .....	167
7.12. Выбор правильного окна сглаживания .....	168
7.13. Масштабирование окон сглаживания .....	169

## ▼ 8

<b>Многоскоростная обработка сигналов в LabVIEW</b> .....	171
8.1. Повышение частоты дискретизации .....	171
8.2. Уменьшение частоты дискретизации .....	173
8.3. Фильтры передискретизации .....	175
8.3.1. Фильтры полуполосы .....	177
8.3.2. Полифазные фильтры .....	179
Резюме .....	181

## ▼ 9

<b>Генерация сигналов в LabVIEW</b> .....	183
9.1. Основные функции .....	183
9.2. Синусоиды .....	185
9.2.1. Комплексный преобразователь .....	185
9.2.2. Функция $\text{sin}(x)$ .....	186
9.2.3. Линейно-частотно-модулированная (ЛЧМ) последовательность .....	188
9.3. Генерация моделей канала связи .....	190
9.3.1. Распределение Рэлея .....	190
9.3.2. Белый гауссовский шум .....	191
9.4. Формирование символов .....	193
Резюме .....	195

## ▼ 10

<b>Сборка узлов системы связи</b> .....	197
10.1. Модулятор .....	198
10.2. Демодулятор .....	200
10.3. Искажения в канале .....	204
10.4. Обнаружение и восстановление сигнала .....	210
10.4.1. Обнаружение и согласованная фильтрация .....	210
10.4.2. Пороговые решения .....	213
10.5. Синхронизация .....	213
10.5.1. Синхронизация по времени .....	213
10.5.2. Синхронизация по частоте .....	215
10.6. Модуляция в NI Toolset .....	216
Резюме .....	218

## ▼ 11

<b>Оптимизация обработки сигналов в LabVIEW</b> .....	219
---	-----

11.1. Общие руководящие принципы кодирования в LabVIEW .....	219
11.2. Подсказки в обработке сигналов .....	221
11.2.1. Линейная свертка на основе БПФ .....	221
11.2.2. Реальное БПФ .....	222
11.3. Дальнейшие применения цифровой обработки сигналов в LabVIEW .....	224
11.3.1. Корни дифференциального уравнения .....	226
11.3.2. Линейный прогнозирующий шифровальщик речи .....	226
Резюме .....	230
<b>▼ 12</b>	
<b>Сопряжение LabVIEW с другими программными продуктами для обработки цифровых сигналов. Пакет LabVIEW Simulation Interface Toolkit .....</b>	<b>231</b>
12.1. Тестирование моделей с использованием интерфейса LabVIEW .....	232
12.2. Дополнительные возможности по тестированию моделей .....	232
12.3. Импортирование моделей из Simulink в LabVIEW .....	235
12.4. Перенос модели в систему реального времени .....	235
<b>▼ 13</b>	
<b>Тестирование и программирование цифровых сигнальных процессоров (DSP) в LabVIEW .....</b>	<b>237</b>
13.1. Пакет LabVIEW DSP Test Toolkit .....	237
13.1.1. Функции автоматизации CCS .....	237
13.1.2. Обмен данными с кодом DSP .....	238
13.1.3. Функции углубленного тестирования сигнальных процессоров (DSP Test Advanced VIs) .....	238
13.2. Пакет LabVIEW DSP Module .....	239
13.2.1. Поддерживаемые аппаратные средства .....	239
13.2.2. Области применения .....	240
<b>▼ 14</b>	
<b>Виброакустический анализ в LabVIEW .....</b>	<b>243</b>
14.1. Функциональные возможности Sound and Vibration Toolkit .....	243
14.2. Поддерживаемые аппаратные средства .....	246
14.3. Перечень и описание виртуальных приборов и функций, входящих в пакет .....	246



14.3.1. Масштабирование .....	246
14.3.2. Калибровка .....	246
14.3.3. Тестирование (измерение) уровней сигналов .....	247
14.3.4. Взвешивание .....	248
14.3.5. Интегрирование .....	248
14.3.6. Генерация .....	249
14.3.7. Уровень вибрации .....	250
14.3.8. Уровень звука .....	250
14.3.9. Октавный анализ .....	250
14.3.10. Частотный анализ .....	251
14.3.11. Анализ переходных процессов .....	251
14.3.12. Каскадный график .....	251
14.3.13. Гармонический анализ .....	251
14.3.14. Анализ искажений .....	251
14.3.15. Чистый тон .....	253

## ▼ 15

<b>Программирование ПЛИС (FPGA) в LabVIEW .....</b>	<b>254</b>
15.1. Реконфигурируемые устройства ввода/вывода (RIO) .....	255
15.2. Создание проектов .....	256
15.3. Последовательность программирования ПЛИС .....	258
Резюме .....	260

## ▼ 16

<b>Инструментарий проектирования цифровых фильтров в LabVIEW .....</b>	<b>261</b>
16.1. Введение в инструментарий проектирования цифровых фильтров в LabVIEW .....	261
16.1.1. Краткий обзор процесса проектирования цифрового фильтра .....	261
16.1.2. Краткий обзор инструментария LabVIEW для проектирования цифрового фильтра .....	262
16.1.3. Обобщенный метод Ремеза и перечень р-х норм синтеза алгоритмов .....	262
16.1.4. Большой выбор структур фильтра .....	263
16.1.5. Специальное проектирование цифрового фильтра .....	263
16.1.6. Проектирование фильтра с фиксированной запятой .....	263
16.1.7. Создание кода для ПЛИС (FPGA) и цифровых сигнальных процессоров (DSP) .....	264
16.1.8. Проектирование многоскоростных цифровых фильтров .....	264

16.1.9. Всесторонние инструментальные средства анализа .....	264
16.1.10. Заметки к пользовательской расширенной библиотеке анализа в LabVIEW (Current LabVIEW Advanced Analysis Library Users) .....	264
16.2. Основы проектирования цифровых фильтров .....	265
16.2.1. Применение цифровых фильтров .....	265
16.2.2. Терминология цифрового фильтра .....	266
16.2.3. Свойства фильтра .....	266
16.2.4. КИХ- и БИХ-фильтры .....	267
16.2.5. Математические определения .....	267
16.2.6. Различие КИХ- и БИХ-фильтров .....	268
16.2.7. Свойства КИХ- и БИХ-фильтров. Технические требования для цифровых фильтров .....	269
16.2.8. Тип фильтра .....	269
16.2.9. Частота дискретизации .....	269
16.2.10. Технические требования к фильтру .....	269
16.2.11. Методы проектирования .....	270
16.2.12. Анализ цифрового фильтра .....	272
16.2.13. Полюса и нули .....	273
16.2.14. Поле нулей и полюсов .....	273
Резюме .....	274
16.3. Основы проектирования фильтра с плавающей запятой .....	275
16.3.1. Типичный процесс проектирования цифрового фильтра с плавающей запятой .....	275
16.3.2. Проектирование фильтров с плавающей запятой .....	276
16.3.3. Ввод технических характеристик фильтра .....	276
16.3.4. Ввод технических характеристик фильтра в цифровом управлении, основанном на текстовом интерфейсе .....	276
16.3.5. Ввод технических характеристик фильтра в графическом интерфейсе .....	278
16.3.6. Выбор метода проектирования .....	278
16.3.7. Анализ проекта фильтра .....	280
16.3.8. Частотная характеристика .....	280
16.3.9. Поле нулей и полюсов .....	280
16.3.10. Определение порядка фильтра .....	280
16.3.11. Пример. Проектирование ФНЧ цифрового фильтра согласно параметрам .....	281
16.3.12. Пример. Фильтрация .....	282
Резюме .....	282
16.4. Основы проектирования фильтра с фиксированной запятой .....	284

---

16.4.1. Типичный процесс проектирования цифрового фильтра с фиксированной запятой .....	284
16.4.2. Осуществление фильтров с фиксированной запятой .....	285
16.4.3. Выбор структуры фильтра .....	287
16.4.4. Выбор структуры для КИХ-фильтров .....	287
16.4.5. Выбор структуры для БИХ-фильтров .....	288
16.4.6. Использование лестничных структур .....	288
16.4.7. Метод проектирования структуры по умолчанию .....	289
16.4.8. Моделирование фильтров с фиксированной запятой .....	289
16.4.9. Квантователи моделирования .....	291
16.4.10. Установка $wl$ и $iwl$ .....	292
16.4.11. Установка режима переполнения .....	293
16.4.12. Установка режима округления .....	293
16.4.13. Установка квантователей вручную .....	293
16.4.14. Проверка достоверности фильтров с фиксированной запятой .....	294
16.4.15. Анализ фильтра с фиксированной запятой .....	294
16.4.16. Пример. Анализ фильтра с фиксированной запятой .....	295
16.4.17. Моделирование фильтра с фиксированной запятой .....	296
16.4.18. Пример. Моделирование фильтра с фиксированной запятой .....	298
16.4.19. Генерация кода .....	300
16.4.20. Извлечение целочисленных коэффициентов фильтра с фиксированной запятой .....	301
16.4.21. Производство кода C для фильтра с фиксированной запятой .....	301
16.4.22. Производство кода LabVIEW фильтра с фиксированной запятой .....	303
16.4.23. Структура целочисленных кодов LabVIEW Code SCTL-Optimized LabVIEW FPGA .....	303
16.4.24. Код SCTL-Optimized LabVIEW FPGA .....	303
16.4.25. Пример. Генерация кода LabVIEW для ПЛИС-Устройства из модели фильтра с фиксированной запятой .....	306
Резюме .....	308
16.5. Расширенные и специальные проекты фильтра .....	309
16.5.1. Фильтры с линейной ФЧХ и минимально-фазовые .....	309
16.5.2. Математическое определение .....	310
16.5.3. Типы КИХ-фильтров с линейной ФЧХ .....	310
16.5.4. Эксперимент с различными типами .....	311
16.5.5. Пример КИХ-фильтра с линейной ФЧХ .....	311
16.5.6. Преобразователи Гильберта (Hilbert) .....	312
16.5.7. Преобразователя Гильберта типа IV .....	313
16.5.8. Преобразователь Гильберта типа III .....	314
16.5.9. Дифференциаторы .....	315

16.5.10. Дифференциатор типа IV .....	316
16.5.11. Дифференциаторов типа III .....	316
16.5.12. Фильтр-пробка и пиковый фильтр .....	318
16.5.13. Пример фильтра-пробки .....	318
16.5.14. Гребенчатые фильтры .....	320
16.5.15. Пример гребенчатого фильтра .....	321
16.5.16. Фильтры с произвольной формой АЧХ .....	323
16.5.17. КИХ-фильтр с линейной ФЧХ и произвольной АЧХ .....	324
16.5.18. Пример фильтра с произвольной АЧХ .....	324
16.5.19. Пример инверсного компенсационного sinc-фильтра .....	325
16.5.20. БИХ-фильтр с произвольной АЧХ .....	326
16.5.21. Компенсатор групповой задержки .....	327
16.5.22. Пример компенсатора групповой задержки .....	327
16.5.23. Узкополосные КИХ-фильтры .....	329
16.5.24. Пример узкополосного фильтра .....	332
Резюме .....	332
16.6. Многоскоростные цифровые фильтры .....	334
16.6.1. Основы многоскоростной цифровой фильтрации .....	334
16.6.2. Повторная дискретизация .....	335
16.6.3. Децимация .....	335
16.6.4. Пример фильтра децимации .....	336
16.6.5. Интерполяция .....	337
16.6.6. Пример интерполирующего фильтра .....	339
16.6.7. Многоскоростные многоступенчатые фильтры .....	340
16.6.8. Многоступенчатый фильтр децимации .....	340
16.6.9. Гребенчатые каскадные фильтры-интеграторы (CIC) .....	341
16.6.10. Фильтр с нулевой ФЧХ .....	342
16.6.11. Разработка многоскоростного фильтра .....	344
16.6.12. Одноступенчатый проект многоскоростного фильтра .....	344
16.6.13. Проектирование многоступенчатых многоскоростных фильтров .....	346
16.6.14. Проектирование фильтра Найквиста .....	347
16.6.15. Фильтры Найквиста .....	348
16.6.16. Фильтры «поднятый косинус» .....	348
16.6.17. Фильтры полуполосы (halfband) .....	349
16.6.18. Анализ многоскоростных фильтров .....	350
16.6.19. Обработка сигналов в многоскоростном фильтре .....	350
Резюме .....	350
16.7. Современные методы проектирования фильтров .....	351
16.7.1. Проектирование методом Ремеза (Remez) .....	351

16.7.2. Использование ВП Remez Design .....	351
16.7.3. Определение заданной передаточной функции .....	352
16.7.4. Определение порядка фильтра .....	353
16.7.5. Выбор типа фильтра .....	353
16.7.6. Симметричные и несимметричные типы фильтра .....	353
16.7.7. Дифференциатор и типы фильтра Гильберта .....	354
16.7.8. Минимально-фазовый и максимально-фазовый типы фильтра .....	354
16.7.9. Аппроксимация АЧХ КИХ-фильтра .....	354
16.7.10. Проектирование минимально-фазовых и максимально-фазовых КИХ-фильтров .....	355
16.7.11. Проектирование минимально-фазовых и максимально-фазовых фильтров в ВП DFD Remez Design .....	357
16.7.12. Полосовой фильтр единственной точки по частоте .....	357
16.7.13. Точная установка значений передаточной функции .....	358
16.7.14. Ограничение пульсаций АЧХ .....	361
16.7.15. Метод Least Pth Norm Design .....	363
16.7.16. Использование ВП DFD Least Pth Norm Design .....	365
16.7.17. Определение заданной передаточной функции .....	365
16.7.18. Определение порядка фильтра .....	365
16.7.19. Определение порядка нормы .....	365
16.7.20. Определение ограничения радиуса полюса .....	366
16.7.21. Проектирование КИХ-фильтров с минимальной величиной р-й нормы и линейной ФЧХ .....	366
16.7.22. Проектирование БИХ-фильтров с приблизительно линейной ФЧХ .....	367
16.7.23. Проектирование минимально-фазового и максимально-фазового БИХ-фильтра .....	367
Резюме .....	369
16.8. Проектирование КИХ-фильтра .....	371
16.8.1. Описание задачи .....	371
16.8.2. Реализация фильтров в LabVIEW .....	371

## ▼ 17

<b>Машинное зрение в LabVIEW</b> .....	381
17.1. Интерактивный помощник NI Vision Assistant .....	381
17.2. Использование библиотеки IMAQ Vision в задачах машинного зрения .....	382
17.2.1. Последовательность создания приложений IMAQ Vision .....	383
17.2.2. Шаги по обработке изображений .....	386

## ▼ 18

**Использование LabVIEW в телекоммуникации.**

<b>Пакет NI Modulation Toolkit</b> .....	389
18.1. Использование функций библиотеки NI Modulation Toolkit при построении цифровых систем связи .....	390
18.2. Кодирование .....	390
18.3. Модуляция .....	392
18.4. Преобразование (повышение) частоты .....	393
18.5. Ухудшения (потери) .....	393
18.6. Преобразование (понижение) частоты .....	393
18.7. Демодуляция .....	393
18.8. Компенсация потерь .....	394
18.9. Декодирование .....	395
18.10. Измерение .....	395
18.11. Визуализация .....	395

## ▼ Приложение 1

**Разработка алгоритмов на основе использования LabVIEW**

<b>MathScript: Часть 1 – Ветви LabVIEW 8 MathScript</b> .....	397
П1.1. Что такое MathScript? .....	397
П1.2. Ветвь LabVIEW – программа MathScript .....	398
П1.3. Введение в LabVIEW и Графическое программирование (Graphical Programming) .....	398
П1.4. Использование ветви MathScript для разработки алгоритмов .....	402
П1.5. Окно LabVIEW MathScript .....	407

## ▼ Приложение 2

**Справочник виртуальных приборов ВП [10]**

<b>в телекоммуникациях</b> .....	411
----------------------------------	-----

## ▼ Приложение 3

**Лабораторная работа. Прохождение случайных колебаний**

<b>через линейные цепи и исследование явления нормализации</b> .....	440
Литература для углубленного изучения .....	446
Вопросы для самоконтроля .....	447
Описание средств для проведения исследования .....	447

Задание на предварительное внеаудиторное исследование .....	450
Задание на лабораторное исследование .....	451
Содержание отчета о проведении исследования .....	451
Контрольные вопросы .....	452
<b>Заключение</b> .....	<b>453</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>454</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>456</b>

# Введение в цифровую обработку сигнала и анализ в LabVIEW



Цифровые сигналы находят применение всюду вокруг нас. Телефонные компании используют цифровые сигналы для передачи человеческого голоса. Радио, телевидение и аудиотехника постепенно преобразовываются в цифровые из-за превосходной точности представления исходных данных, малого шума и гибкости обработки сигналов. Данные передаются со спутников на наземные станции в цифровой форме. Изображения отдаленных планет и космоса часто обрабатываются в цифровой форме, чтобы убрать шум и извлечь полезную информацию. Экономические данные, результаты переписи населения и курсы ценных бумаг на фондовом рынке доступны всем в цифровой форме. Из-за многих преимуществ цифровой обработки сигналов (ЦОС) аналоговые сигналы все чаще преобразуют в цифровую форму, чтобы затем выполнить их обработку на компьютере.

Этот раздел является вводным в основы ЦОС и, в частности, в обработку сигналов и измерение их параметров и характеристик с помощью пакета программ LabVIEW. В этом пакете реализована концепция графического программирования алгоритмов преобразования и обработки цифровых сигналов. Программа алгоритма при этом выглядит как функциональная схема устройства обработки данных, а запрограммированная задача (приложение) предстает в виде виртуального прибора (ВП) или виртуального инструмента (Virtual Instrument). В LabVIEW уже заложен обширный набор способов обработки данных в виде готовых узлов (устройств), которые можно включить в виртуальный прибор, что существенно упрощает и ускоряет разработку приложений анализа данных.

**Дискретизация сигналов.** В большинстве практических приложений обработке подлежат сигналы, как правило, аналоговые, т.е. непрерывные во времени и принимающие бесчисленное множество значений; непосредственно к ним методы и алгоритмы ЦОС применить нельзя. Чтобы использовать цифровые методы обработки сигналов, необходимо сначала преобразовать аналоговый сигнал в его



цифровую форму. Для этого аналоговые сигналы сначала превращают в **дискретные сигналы** – в последовательность их отсчетов (дискретных значений), взятых через одинаковые интервалы времени, а затем каждый отсчет преобразуют в цифровой код (операция квантования по уровню). Только после этого к полученной последовательности цифровых кодов становится возможным применение методов и алгоритмов ЦОС.

***Примечание.** В российской математической и технической литературе совокупность отсчетов аналогового сигнала называется выборкой. В иностранной литературе под выборкой часто понимают один отсчет сигнала. В тексте далее, во избежание различных толкований, один отсчет сигнала будет также называться единичным измерением в выборке или выборкой единичного размера.*

Наиболее типична ситуация, когда аналоговый сигнал  $s(t)$  дискретизируется через постоянный интервал времени  $\Delta t$ , называемый периодом, интервалом или шагом дискретизации. Его обратная величина  $f_s = 1/\Delta t$  является частотой дискретизации. Круговая частота дискретизации определяется по формуле  $\Omega_s = 2\pi/\Delta t$ .

Каждое из дискретных значений  $x(t)$  в моменты  $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$  является отсчетом или единичным измерением, а  $N$  таких отсчетов называется выборкой размера  $N$  (каждый отсчет можно также назвать выборкой единичного размера  $N = 1$ ). В реальных устройствах преобразование аналогового сигнала в цифровой осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) (analog-digital converter – A/D).

Таким образом,  $x(0), x(\Delta t), x(2\Delta t), \dots$  являются единичными измерениями мгновенных значений аналогового сигнала в выборке бесконечного (теоретически) размера. Полученный дискретный сигнал может быть представлен набором выборочных данных

$$\{x(0), (\Delta t), x(2\Delta t), (3\Delta t), \dots, (k\Delta t), \dots\}.$$

На рис. 1.1 показан некоторый аналоговый сигнал на ограниченном интервале времени (непрерывная функция) и совокупность его отсчетов (точек), взятых через равные интервалы времени  $\Delta t$ .

Если моментам времени, в которые взяты отсчеты сигнала, присвоить номера, например,  $i = 0, 1, 2, \dots$ , то  $x[i] = x(i\Delta t)$  будет являться одним из этих отсчетов ( $i$ -м отсчетом).

Сигнал  $x(t)$ , таким образом, может быть представлен набором отсчетов (вектором-строкой)

$$\mathbf{X} = \{x(0), x(\Delta t), x(2\Delta t), x(3\Delta t), \dots, x(k\Delta t), \dots\} = \{x[0], x[1], x[2], x[3], \dots, x[k], \dots\}.$$

Очень важно при этом правильно выбрать интервал дискретизации  $\Delta t$ , т. е. решить задачу: как часто необходимо брать отсчеты аналогового сигнала, чтобы сохранить информацию, содержащуюся в нем, в дискретном сигнале без потерь или в пределах допустимых потерь (искажений).

На самом деле ответ очевиден: нужно брать отсчеты аналогового сигнала как можно чаще. При этом потери информации действительно можно сделать пренеб-

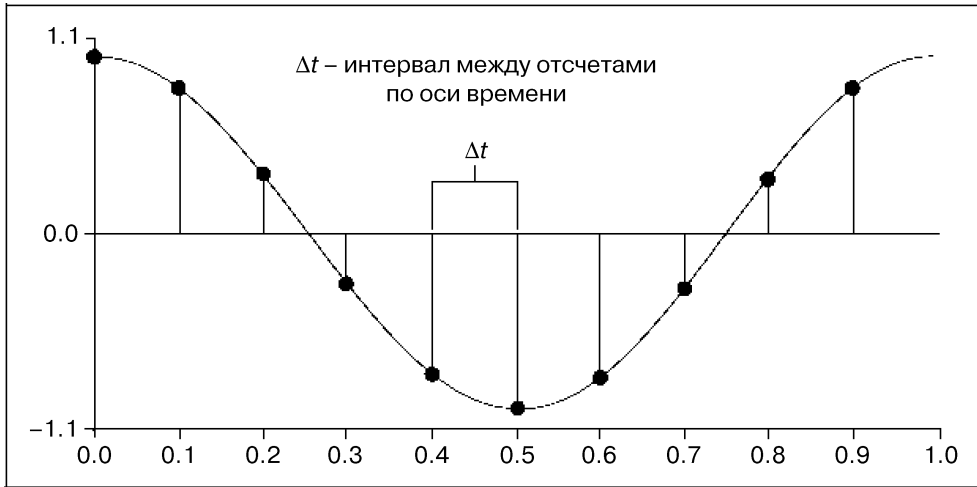


Рис. 1.1. Аналоговый сигнал и его выборка размера  $N = 10$

режимом малыми. Однако такой подход заставляет повышать требования к узлам устройства ЦОС по быстродействию, а это, как следствие, приводит к неоправданно высокой стоимости этого устройства. Поэтому задача выбора частоты дискретизации сводится к нахождению такой **минимальной** частоты  $f_s$  дискретизации, при которой потери информации будут приемлемо малы.

Необходимо всегда иметь в виду, что последовательность  $\mathbf{X} = \{x[i]\}$  является совокупностью отсчетов и не содержит никакой информации о частоте дискретизации. Поэтому значения отсчетов, содержащиеся в  $\mathbf{X}$ , не несут никакой информации об абсолютных временных или частотных свойствах исходного аналогового сигнала.

В LabVIEW для работы с сигналами предусмотрено несколько типов данных – массивы (Array), осциллограммы (временные диаграммы) (Waveform) и динамические данные (Dynamic).

Данные типа Array представляют собой последовательность чисел, аналогичную набору отсчетов  $\mathbf{X}$ .

Данные типа Waveform содержат последовательность отсчетов, а также время получения первого отсчета, значение интервала дискретизации и комментарии к данным.

Данные типа Dynamic близки, по сути, к данным типа Waveform и также содержат последовательность отсчетов, сведения о дате и времени получения первого отсчета, значение интервала дискретизации, имя сигнала и др.

Обобщенная структурная схема устройства ЦОС представлена на рис. 1.2 со следующими обозначениями: АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦВ – цифровой вычислитель; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ФНЧ – сглаживающий фильтр нижних частот. На входе и выходе этого устройства сигналы аналоговые, соответственно  $s_{вх}(t)$  и  $s_{вых}(t)$ .

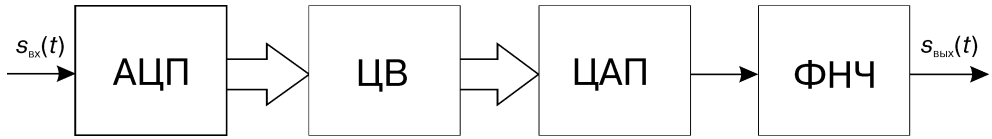


Рис. 1.2. Структурная схема устройства цифровой обработки сигналов

В частных случаях входной и выходной сигналы устройства ЦОС могут быть цифровыми, и тогда необходимость в использовании АЦП, ЦАП и ФНЧ отпадает.

Необходимые свойства устройства ЦОС обеспечиваются, в основном, заложенным в ЦВ алгоритмом преобразования последовательности отсчетов, поступающей с выхода АЦП. В определенном смысле устройство ЦОС универсально, так как заменой только алгоритма преобразования последовательности отсчетов в ЦВ можно существенно изменить свойства всего устройства ЦОС.

**Частота дискретизации и «ложные» частоты (alias).** Один из самых важных параметров устройства ЦОС – частота дискретизации, определяющая, как часто во времени выполняется аналого-цифровое (А/D) преобразование. Она существенно зависит от свойств аналогового сигнала и допустимых потерь информации при дискретизации. Слишком малая частота дискретизации приводит к появлению в дискретном сигнале «ложных» составляющих [16, 17, 18], не содержащихся в исходном аналоговом сигнале, что вызывает значительные, часто недопустимые, искажения выходного сигнала  $s_{\text{вых}}(t)$  устройства ЦОС.

На рис. 1.3 и 1.4 показаны аналоговый гармонический сигнал с отмеченными на нем отсчетами и соответствующий дискретный сигнал при различных соотношениях частоты сигнала и частоты дискретизации.

Из этих рисунков следует, что при частоте дискретизации  $f_s = 40$  кГц дискретный сигнал правильно представляет свойства аналогового сигнала с частотой  $f_0 = 2$  кГц и неправильно – с частотой  $f_0 = 42$  кГц. Следует заметить, что дискретные сигналы на рис. 1.3 и 1.4 одинаковы! То есть из аналогового сигнала с частотой  $f_0 = 42$  кГц сформировался дискретный сигнал, соответствующий аналоговому с частотой  $f_0 = 2$  кГц. Это можно описать и по-другому: произошел перенос высокочастотной составляющей в область низких частот – возникла составляющая с «ложной» низкой частотой (alias), которой нет в исходном аналоговом сигнале.

Для подробного ознакомления с данным эффектом можно запустить ВП `diskr_cos` и понаблюдать за получающимся дискретным сигналом при различных сочетаниях частоты аналогового сигнала и частоты дискретизации.

Частота «ложной» составляющей равна абсолютному значению наименьшей разности между частотой аналогового сигнала и частотами, кратными частоте дискретизации. Например, при частоте дискретизации  $f_s = 40$  кГц «ложные составляющие» с частотой 2 кГц будут получены при следующих частотах аналогового сигнала:

- $f_0 = 38$  кГц    ( $2 = |38 - 40 \cdot 1|$ );
- $f_0 = 42$  кГц    ( $2 = |42 - 40 \cdot 1|$ );
- $f_0 = 78$  кГц    ( $2 = |78 - 40 \cdot 2|$ );

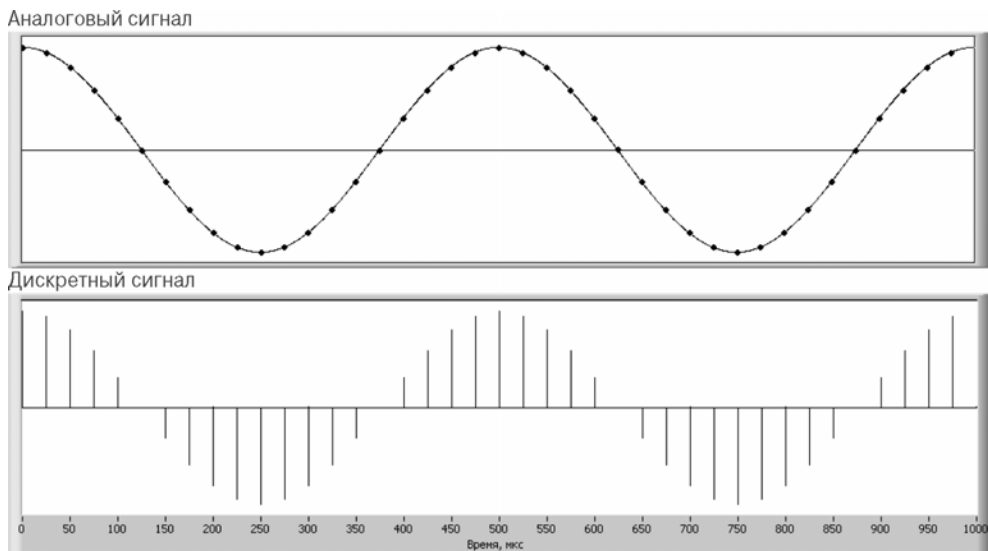


Рис. 1.3. Аналоговый гармонический и дискретный сигналы: частота сигнала  $f_0 = 2$  кГц, частота дискретизации  $f_s = 40$  кГц

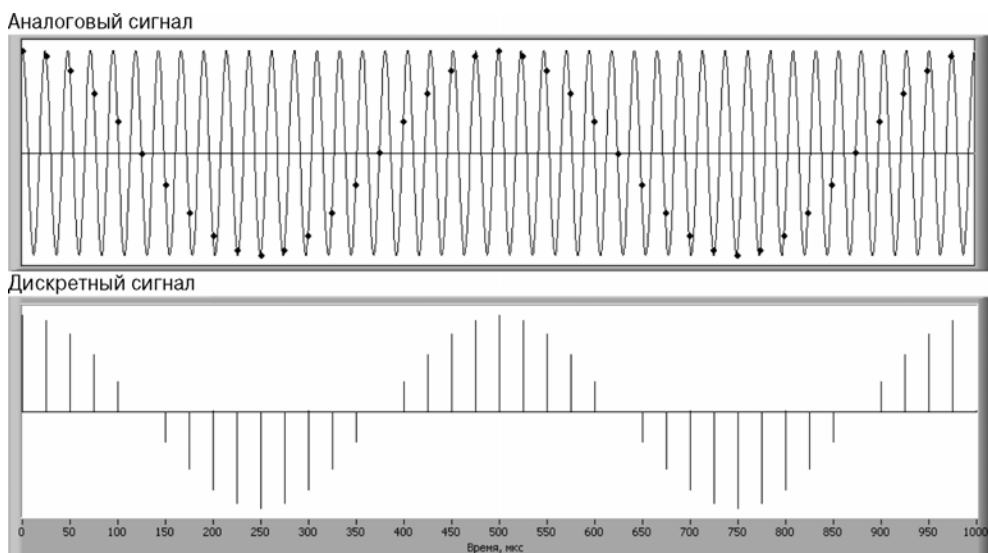


Рис. 1.4. Аналоговый гармонический и дискретный сигналы: частота сигнала  $f_0 = 42$  кГц, частота дискретизации  $f_s = 40$  кГц

- $f_0 = 82$  кГц ( $2 = |82 - 40 \cdot 2|$ );
- $f_0 = 118$  кГц ( $2 = |118 - 40 \cdot 3|$ );
- $f_0 = 122$  кГц ( $2 = |122 - 40 \cdot 3|$ ) и т. д.

Если при частоте дискретизации  $f_s = 40$  кГц аналоговый сигнал будет состоять из гармонических составляющих, например, с частотами  $f_{01} = 3$  кГц,  $f_{02} = 28$  кГц,  $f_{03} = 36$  кГц,  $f_{04} = 45$  кГц,  $f_{05} = 79$  кГц, то дискретный сигнал будет иметь составляющие с частотами:

- $f_0 = 3$  кГц =  $|3 - 40 \cdot 0|$  – «правильная» составляющая;
- $f_{a2} = 12$  кГц =  $|28 - 40 \cdot 1|$  – «ложная» составляющая;
- $f_{a3} = 4$  кГц =  $|36 - 40 \cdot 1|$  – «ложная» составляющая;
- $f_{a4} = 5$  кГц =  $|45 - 40 \cdot 1|$  – «ложная» составляющая;
- $f_{a5} = 1$  кГц =  $|79 - 40 \cdot 2|$  – «ложная» составляющая.

Несложно сделать вывод, что при частоте дискретизации  $f_s = 40$  кГц составляющие аналогового сигнала, преобразующиеся в «правильные» составляющие дискретного сигнала, должны иметь частоту меньше 20 кГц, а все составляющие аналогового сигнала с частотами больше 20 кГц преобразуются в «ложные» составляющие.

Эта граничная частота (20 кГц в рассмотренном примере) носит специальное название «частота Найквиста» (Nyquist):

$$f_N = \frac{f_s}{2}.$$

***Примечание.** Частоты «ложных» составляющих также не превышают частоту  $f_N$ .*

Так как в дискретном сигнале невозможно различить «правильные» и «ложные» составляющие, то для получения дискретного сигнала, правильно описывающего свойства исходного аналогового сигнала, необходимо выполнение условия

$$f_{0i} < f_N,$$

где  $f_{0i}$  – частоты гармонических составляющих исходного аналогового сигнала.

**Увеличение частоты дискретизации для исключения «ложных» составляющих.** Согласно теореме отсчетов (теореме Котельникова или теореме Шеннона – Shannon Sampling Theorem), чтобы избежать появления «ложных» составляющих, необходимо использовать частоту дискретизации  $f_s$ , как минимум, в 2 раза большую, чем  $f_{0\max}$  – максимальная частота составляющей исходного сигнала:

$$f_s \geq 2f_{0\max}.$$

Важно заметить, что, хотя теоретически достаточно выполнения условия  $f_s = 2f_{0\max}$ , на практике всегда используется  $f_s > 2f_{0\max}$ , так как при этом существенно упрощается ФНЧ в устройстве ЦОС, восстанавливающий аналоговый сигнал  $s_{\text{вых}}(t)$  из дискретного сигнала.

**Фильтры для исключения сглаживания.** Даже при частоте дискретизации, равной  $2f_{0\max}$ , на вход устройства ЦОС вместе с аналоговым сигналом могут воздействовать помехи, например, от мощных линий электропередач или местных радиостанций, которые могут содержать составляющие с частотами выше часто-

ты Найквиста. Такие составляющие приведут к появлению «ложных» составляющих и исказят полезный сигнал. Поэтому из входного аналогового сигнала необходимо удалять составляющие с частотами выше частоты Найквиста прежде, чем этот сигнал поступит на вход АЦП.

Для этого используют **аналоговый** фильтр нижних частот (ФНЧ), включенный перед АЦП (Anti-alias Filter). Этот ФНЧ должен пропускать составляющие с частотами ниже частоты Найквиста и не пропускать составляющие с частотами выше ее. Тем самым будет предотвращено появление в дискретном сигнале «ложных» составляющих.

Аналоговый ФНЧ должен не исказить полезный аналоговый сигнал. Для этого он должен иметь плоскую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в полосе частот ( $0 \dots f_N$ ) (необходимое, но не достаточное условие). В то же время для составляющих с частотами  $f > f_N$  этот ФНЧ должен иметь коэффициент передачи, равный нулю. Такой ФНЧ называется идеальным, его АЧХ показана на рис. 1.5, а (Ideal Anti-alias Filter).

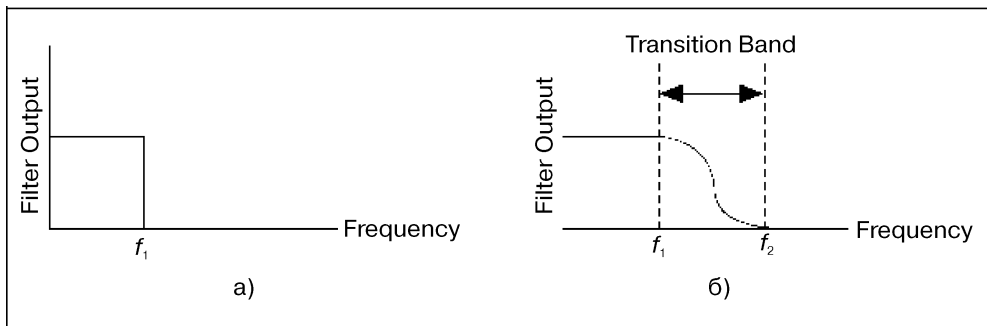


Рис. 1.5. Идеальный (а) и реальный (б) ФНЧ:

$f_1$  – максимальная частота полезной составляющей входного сигнала; составляющие входного сигнала с частотами  $f > f_1$  – помехи;  $f_1 \dots f_2$  – переходная полоса (Transition Band) реального ФНЧ (Practical Anti-alias Filter)

Идеальный ФНЧ наилучшим образом предотвращает появление «ложных» составляющих, однако он физически не осуществим. Для реальных ФНЧ характерна некоторая неравномерность АЧХ в полосе пропускания  $0 < f < f_1$ , наличие переходной полосы  $f_1 < f < f_2$ , в которой коэффициент передачи фильтра с ростом частоты плавно уменьшается до необходимо малого значения, и полосы подавления  $f_2 < f < \infty$ , для которой коэффициент передачи фильтра достаточно мал (см. рис. 1.5).

Поскольку в переходной полосе ФНЧ не полностью подавляет составляющие помех, то они будут создавать в дискретном сигнале «ложные» составляющие. Для исключения этого частоту дискретизации следует задавать исходя не из условия  $f_s \geq 2f_1$ , а из условия  $f_s \geq 2f_2$ . Это приводит к некоторому повышению требований к узлам устройства ЦОС по быстродействию, но обеспечивает необходимую точность обработки аналогового сигнала.

**Примечание.** Требования к ФНЧ определяются, в основном, наличием на входе устройства ЦОС смеси аналогового сигнала и помех, частотным составом помех и их интенсивностью. Если помехи отсутствуют, то ФНЧ перед АЦП не нужен.

**Использование логарифмических единиц.** На индикаторах приборов значение некоторой величины обычно отображают или в линейном, или в логарифмическом масштабе.

Линейный масштаб наиболее привычен для восприятия, так как широко используется для отображения графиков зависимостей в школьных курсах физики, математики, в быту.

Логарифмический масштаб используется реже, в основном тогда, когда нужно на одном графике одинаково подробно отобразить величину как в поддиапазоне малых, так и в поддиапазоне больших ее значений. В логарифмическом масштабе шкалу индикатора можно проградуировать непосредственно в значениях самой величины. В этом случае в начале шкалы будет обязательно ненулевое значение, а сама шкала будет неравномерная – сгущающаяся к концу. Иногда оказывается удобным индексировать не значение величины, а его отношение к некоторому значению, выбранному в качестве опорного. Тогда удобно использовать логарифмическую шкалу, проградуированную в децибелах (дБ), которая является равномерной.

Децибел – универсальная единица выражения отношений уровней величин, не зависящие от того, какими параметрами являются эти уровни: амплитудами, среднеквадратическими значениями (СКЗ) или мощностями.

Следующие формулы предназначены для определения отношений уровней величин в децибелах:

- для отношения мощностей величин

$$D = 10 \log_{10} \frac{P}{P_0};$$

- для отношения амплитуд или СКЗ величин

$$D = 20 \log_{10} \frac{A}{A_0}.$$

Значения мощности  $P_0$  и амплитуды или СКЗ  $A_0$  иногда называют опорными значениями, по сравнению с которыми определяются отношения уровней.

В ряде случаев за опорные значения принимают константы, значения которых определяются областью использования.

Например, в радиотехнике, акустике часто уровень величины выражается в отношениях к следующим константам:

- мощность 1 мВт на сопротивлении 50 Ом для радиосигналов (СКЗ = 0,224 В) – уровень величины выражается в децибел-милливаттах (дБ·м);
- мощность 1 мВт на сопротивлении 600 Ом для аудиосигналов (СКЗ = 0,775 В) – уровень величины выражается в децибел-милливаттах (дБ·м);

- дисперсия  $1 \text{ В}^2$  – уровень величины выражается в децибел-вольтах СКО ( $\text{дБ} \cdot \text{В}_{\text{rms}}$ );
  - амплитуда  $1 \text{ В}$  – уровень величины выражается в децибел-вольтах ( $\text{дБ} \cdot \text{В}$ );
- В табл. 1.1 приведены часто используемые отношения уровней величин в децибелах, отношения мощностей и отношения амплитуд (СКО).

Таблица 1.1 показывает, как можно сжать широкий диапазон амплитуд в небольшой диапазон чисел, используя логарифмический масштаб в децибелах.

Таблица 1.1. Децибелы и отношения мощностей и напряжений

дБ	Отношение мощностей	Отношение напряжений
+60	1 000 000	1 000
+40	10 000	100
+30	1 000	31,6
+20	100	10
+10	10	3,16
+6	4	2
+3	2	1,414
+2	1,585	1,259
+1	1,259	1,122
0	1	1
-1	0,794	0,891
-2	0,631	0,794
-3	0,5	0,707
-6	0,25	0,5
-10	0,1	0,316
-20	0,01	0,1
-30	0,001	0,0316
-40	0,0001	0,01
-60	0,00001	0,001

**Пример.** Для приближенного, но быстрого перевода уровня, выраженного в децибелах, в отношение, например, напряжений можно пользоваться следующим алгоритмом. Для упрощения необходимо помнить, что величина в децибелах может быть представлена в виде суммы простых слагаемых, которым соответствуют известные отношения напряжений. После перевода слагаемых в отношения их необходимо перемножить для получения результата преобразования. Например, необходимо перевести 16 дБ в отношение напряжений. Представим число 16 в виде слагаемых  $6 + 6 + 3 + 1$ . Этим слагаемым соответствуют отношения напряжений: 2, 2, 1,41 и 1,1. После их перемножения получим приблизительно 6,2.

Для получения того же уровня 16 дБ в отношение по мощности: те же слагаемые в децибелах соответствуют множителям: 4, 4, 2, 1,21 (см. табл. 1.1). После перемножения получим приблизительно 38, что соответствует отношению напряжений 6,2, возведённому в квадрат.

Необходимо заметить, что значениям уровня в децибелах ниже 1 дБ соответствуют почти линейные шкалы отношений по мощности и по напряжению, что упрощает преобразование малых уровней, выраженных в децибелах, в отношение напряжений или мощностей.