

УДК 681.3.06(075.8)
ББК 32.973.26-108.2
Ф33

Рецензенты:

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

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

Федосов, Валентин Петрович.

Ф33 Цифровая обработка сигналов в LabVIEW : учебное пособие / В. П. Федосов, А. К. Нестеренко ; под ред. В. П. Федосова. — 2-е изд., эл. — 1 файл pdf : 470 с. — Москва : ДМК Пресс, 2023. — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-396-7

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

Электронное издание на основе печатного издания: Цифровая обработка сигналов в LabVIEW : учебное пособие / В. П. Федосов, А. К. Нестеренко ; под ред. В. П. Федосова. — Москва : ДМК Пресс, 2013. — 470 с. — ISBN 978-5-94074-967-7. — Текст : непосредственный.

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.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-396-7

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



Предисловие	16
--------------------------	-----------

▼ 1

Введение в цифровую обработку сигнала и анализ в LabVIEW	18
---	-----------

▼ 2

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

▼ 3

Получение сигнала в LabVIEW	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

Цифровая фильтрация(Digital Filtering)	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

Спектральный анализ	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 (Brms) 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

Примеры спектрального анализа в LabVIEW	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

Окна сглаживания (Smoothing windows)	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

Многоскоростная обработка сигналов в LabVIEW	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

Генерация сигналов в LabVIEW	183
9.1. Основные функции	183
9.2. Синусоиды	185
9.2.1. Комплексный преобразователь	185
9.2.2. Функция $\text{sinc}(x)$	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

Сборка узлов системы связи	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

Оптимизация обработки сигналов в LabVIEW	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

▼ 12

Сопряжение LabVIEW с другими программными продуктами для обработки цифровых сигналов. Пакет LabVIEW Simulation Interface Toolkit	231
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

▼ 13

Тестирование и программирование цифровых сигнальных процессоров (DSP) в LabVIEW	237
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

▼ 14

Виброакустический анализ в LabVIEW	243
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

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

▼ 16

Инструментарий проектирования цифровых фильтров в LabVIEW	261
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 wI 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 r-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

Машинное зрение в LabVIEW	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.

Пакет NI Modulation Toolkit	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

MathScript: Часть 1 – Ветви LabVIEW 8 MathScript	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]

в телекоммуникациях	411
----------------------------------	-----

▼ Приложение 3

Лабораторная работа. Прохождение случайных колебаний

через линейные цепи и исследование явления нормализации	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
Заключение	453
Список литературы	454
Список литературы	456