

# Цифровая обработка сигналов в LabVIEW

Книга 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.

Издание предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и специалистов, изучивших начальный курс LabVIEW.



**Федосов Валентин Петрович.** Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники Технологического института Южного Федерального университета в г. Таганроге, почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, автор 14 изобретений и около 300 научных и учебно-методических работ. Область научных интересов – цифровая обработка пространственно-временных сигналов в радио-, гидролокации и связи, анализ случайных процессов, вибродиагностика. Организатор Южно-Российского регионального центра технологий National Instruments.



**Нестеренко Андрей Константинович.** Аспирант кафедры теоретических основ радиотехники Технологического института Южного Федерального университета в г. Таганроге. Область научных интересов – спектральный анализ сигналов, системы сбора данных. Специалист, сертифицированный по LabVIEW (уровень CLAD).

Internet-магазин: [www.abook.ru](http://www.abook.ru)

Книга – почтой:  
Россия, 123242, Москва, а/я 20  
e-mail: [post@abook.ru](mailto:post@abook.ru)

Оптовая продажа: «Альянс-книга»  
Тел./факс: (495) 258-9195  
e-mail: [abook@abook.ru](mailto:abook@abook.ru)



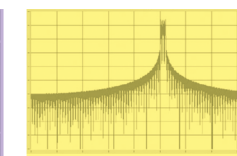
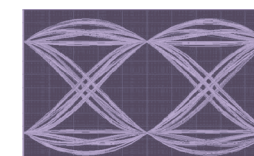
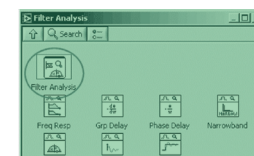
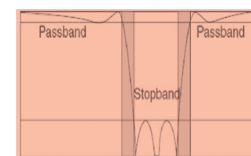
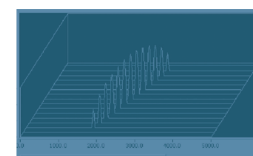
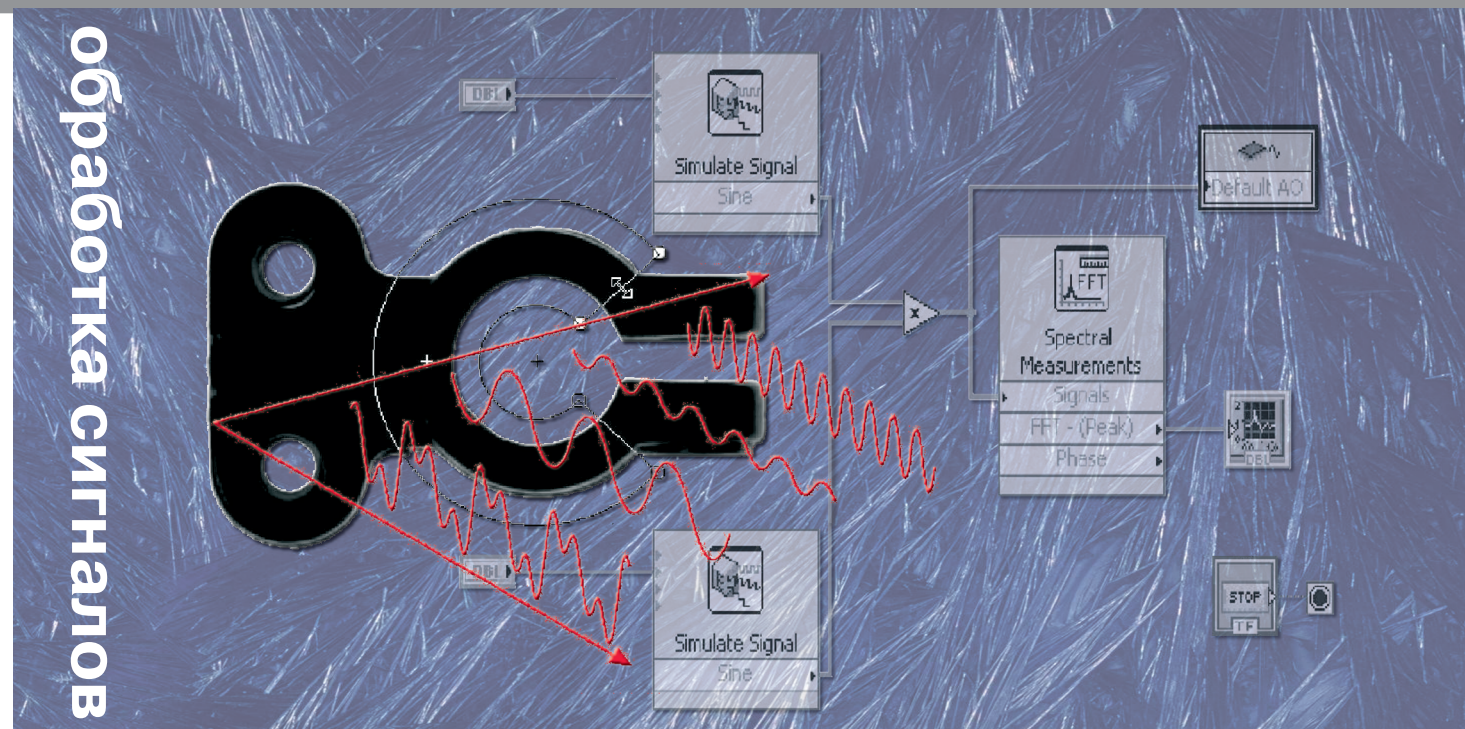
Цифровая

обработка сигналов

в LabVIEW



# Цифровая обработка сигналов в LabVIEW



Федосов В. П.  
Нестеренко А. К.



Федосов В. П., Нестеренко А. К.

# Цифровая обработка сигналов в LabVIEW

Под редакцией Федосова В. П.



Москва

**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. – 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.  
 © Оформление, ДМК Пресс



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

## ▼ 1

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

## ▼ 2

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

## ▼ 3

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Получение сигнала в LabVIEW .....</b>                            | <b>38</b> |
| 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>                               | <b>60</b> |
| 4.1. Введение в фильтрацию .....  | 60        |
| 4.2. Преимущества цифровой фильтрации по сравнению с аналоговой фильтрацией ..... | 60        |



## 4 Цифровая обработка сигналов в LabVIEW

|   |    |
|---|----|
| 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<br>на основе использования алгоритма Parks-McClellan ..... | 73 |
| 4.6.5. Проектирование Equiripple КИХ-фильтров<br>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>                                  | <b>93</b> |
| 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<br>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<br>постоянной составляющей .....                               | 108 |
| 5.5.7. Математическое представление двустороннего БПФ,<br>центрированного относительно постоянной составляющей ..... | 108 |
| 5.5.8. Создание двустороннего БПФ с постоянной составляющей<br>в центре .....  | 109 |
| 5.6. Спектр мощности .....   | 111 |
| 5.6.1. Преобразование двустороннего спектра мощности<br>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<br>мощности .....   | 115 |
| 5.6.6. Вычисление амплитудных и фазовых спектров .....   | 116 |
| 5.6.7. Вычисление амплитуды в вольтах среднеквадратических<br>значений (Vrms) и начальной фазы в градусах .....      | 118 |
| 5.6.8. Частотная характеристика .....  | 118 |
| 5.7. Перекрестный (взаимный) спектр мощности (Cross Power<br>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 |

## 6 Цифровая обработка сигналов в LabVIEW

|  |     |
|--|-----|
| 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 С 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<br>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 $\text{sinc}(x)$ .....                                 | 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

|  |     |
|--|-----|
| <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<br>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<br>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<br>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,<br>входящих в пакет ..... | 246 |