

А. И. Солонина, С. М. Арбузов

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ моделирование в MATLAB

- *Введение в MATLAB*
- *Синтез цифровых фильтров*
- *Дискретное преобразование Фурье*
- *Адаптивная цифровая фильтрация*
- *Эффекты квантования*
- *Многоскоростные цифровые системы*
- *Вейвлет-преобразования*

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



А. И. Солонина
С. М. Арбузов

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ моделирование в MATLAB

*Рекомендовано УМО по образованию в области телекоммуникаций
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки дипломированных
специалистов 210400 "Телекоммуникации"*

Санкт-Петербург
«БХВ-Петербург»
2008

УДК 681.3.06 (075.8)

ББК 32.973(я73)

С60

Солонина, А. И.

С60 Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB
/ А. И. Солонина, С. М. Арбузов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. —
816 с.: ил. — (Учебное пособие)

ISBN 978-5-9775-0259-7

Рассматриваются базовые методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС) и их компьютерное моделирование с помощью системы MATLAB. Излагаются основные режимы работы системы MATLAB, матричные вычисления, стандартные численные методы и формирование графиков. Подробно рассматривается специфика представления сигналов и систем ЦОС на языке MATLAB, описываются линейные дискретные системы, синтез КИХ- и БИХ-фильтров, адаптивная цифровая фильтрация, квантование, вейвлеты и моделирование этих объектов и процессов ЦОС программными средствами MATLAB, а также ряд графических программ, входящих в пакет расширений MATLAB и предназначенных для решения задач ЦОС с помощью пользовательского графического интерфейса без прямого доступа к программным средствам MATLAB.

*Для студентов и преподавателей вузов,
а также специалистов по цифровой обработке сигналов*

Рецензенты:

М. С. Куприянов, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ"

В. А. Варгаузин, к. т. н., доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

УДК 681.3.06(075.8)

ББК 32.973(я73)

Группа подготовки издания:

| | |
|-------------------------|-----------------------------|
| Главный редактор | <i>Екатерина Кондукова</i> |
| Зам. главного редактора | <i>Татьяна Лапина</i> |
| Зав. редакцией | <i>Григорий Добин</i> |
| Редактор | <i>Нина Седых</i> |
| Компьютерная верстка | <i>Натальи Смирновой</i> |
| Корректор | <i>Виктория Пиотровская</i> |
| Дизайн серии | <i>Игоря Цырульникова</i> |
| Оформление обложки | <i>Елены Беляевой</i> |
| Зав. производством | <i>Николай Тверских</i> |

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 30.05.08.

Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 65,78.

Тираж 1500 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 194354, Санкт-Петербург, ул. Есенина, 5Б.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.60.953.Д.002108.02.07 от 28.02.2007 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 978-5-9775-0259-7

© Солонина А. И., Арбузов С. М., 2008

© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2008

Оглавление

| | |
|--|-----------|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 1 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ | 3 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ | 5 |
| ЧАСТЬ I. ВВЕДЕНИЕ В MATLAB | 7 |
| ГЛАВА 1. ЗНАКОМСТВО С СИСТЕМОЙ MATLAB | 9 |
| 1.1. Принятые обозначения | 10 |
| 1.2. Установка и запуск MATLAB | 11 |
| 1.3. Интерфейс MATLAB | 13 |
| 1.4. Система помощи MATLAB | 16 |
| ГЛАВА 2. РЕЖИМ ПРЯМЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ | 24 |
| 2.1. Команды | 25 |
| 2.2. Операторы: оператор присваивания | 26 |
| 2.3. Константы | 27 |
| 2.4. Переменные | 34 |
| 2.5. Функции | 37 |
| 2.6. Выражения | 43 |
| 2.7. Символы и функции операций | 44 |
| 2.8. Рабочая область памяти Workspace: команды <i>who</i> , <i>whos</i> , <i>clear</i> | 51 |
| 2.9. Сохранение данных на диске: команды <i>save</i> , <i>load</i> | 53 |
| 2.10. Создание собственной папки и сохранение пути к ней | 53 |

| | |
|--|------------|
| ГЛАВА 3. МАТРИЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ..... | 55 |
| 3.1. Элементы матриц и обращение к ним | 56 |
| 3.2. Длина вектора и размер матрицы: функции <i>length</i> , <i>size</i> | 58 |
| 3.3. Функции генерации типовых матриц | 58 |
| 3.4. Формирование векторов и подматриц из матрицы | 61 |
| 3.5. Конкатенация подматриц и векторов в матрицы | 63 |
| 3.6. Копирование матриц: функция <i> repmat </i> | 64 |
| 3.7. Поэлементные операции с матрицами..... | 65 |
| 3.8. Операции с матрицами в задачах линейной алгебры..... | 66 |
| 3.9. Операции с матрицами в задачах математической статистики: функции <i>max</i> , <i>min</i> , <i>sort</i> , <i>sum</i> , <i>prod</i> , <i>cumsum</i> , <i>diff</i> , <i>mean</i> , <i>std</i> , <i>var</i> , <i>cov</i> , <i>corrcoef</i> | 103 |
| ГЛАВА 4. ТИПЫ МАССИВОВ..... | 111 |
| 4.1. Числовые массивы..... | 111 |
| 4.2. Нечисловые массивы..... | 114 |
| 4.3. Определение типа данных: функция <i>class</i> | 124 |
| ГЛАВА 5. ГРАФИКА | 127 |
| 5.1. Двумерная графика: команды <i>figure</i> , <i>hold on</i> , <i>hold off</i> ; функция <i>subplot</i> | 127 |
| 5.2. Оформление графиков: команда <i>grid</i> , функции <i>title</i> , <i>xlabel</i> , <i>ylabel</i> , <i>gtext</i> , <i>legend</i> , <i>xlim</i> , <i>ylim</i> | 129 |
| 5.3. Двумерные графики: функции <i>plot</i> , <i>loglog</i> , <i>semilogx</i> , <i>semilogy</i> , <i>logspace</i> , <i>fplot</i> | 130 |
| 5.4. Управление свойствами графиков | 135 |
| 5.5. Специальные двумерные графики: функции <i>stem</i> , <i>stairs</i> , <i>polar</i> , <i>compass</i> , <i>bar</i> , <i>pie</i> , <i>hist</i> | 139 |
| 5.6. Трехмерная графика | 145 |
| 5.7. Формирование сетки на плоскости <i>XOY</i> : функция <i>meshgrid</i> | 145 |
| 5.8. Трехмерные графики: функции <i>plot3</i> , <i>mesh</i> , <i>meshc</i> , <i>meshz</i> , <i>surf</i> , <i>surfl</i> , <i>surfc</i> , <i>contour3</i> | 146 |
| 5.9. Управление свойствами трехмерных графиков: функция <i>colormap</i> ; команды <i>shading interp</i> , <i>colorbar</i> | 150 |
| ГЛАВА 6. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ | 153 |
| 6.1. Операции с многочленами | 153 |
| 6.2. Корни уравнения: функция <i>fzero</i> | 159 |

| | |
|--|------------|
| 6.3. Аппроксимация и интерполяция | 161 |
| 6.4. Минимизация функций: функции <i>fminbnd</i> , <i>fminsearch</i> | 169 |
| 6.5. Численное интегрирование: функции <i>trapz</i> , <i>cumtrapz</i> , <i>quad</i> , <i>quad1</i> , <i>dblquad</i> | 172 |
| 6.6. Численное интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений | 174 |
| ГЛАВА 7. РЕЖИМ ПРОГРАММИРОВАНИЯ..... | 187 |
| 7.1. Программы пользователя — М-файлы..... | 188 |
| 7.2. Структура function-файлов: функции <i>nargin</i> , <i>nargout</i> ; команды <i>type</i> , <i>global</i> ; оператор <i>return</i> | 188 |
| 7.3. Структура script-файлов: команды <i>echo on</i> , <i>echo off</i> | 192 |
| 7.4. Разработка программ в MATLAB | 194 |
| 7.5. Работа с М-файлами | 208 |
| ЧАСТЬ II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦОС ПРОГРАММНЫМИ СРЕДСТВАМИ MATLAB..... | 217 |
| ГЛАВА 8. ДИСКРЕТНЫЕ СИГНАЛЫ..... | 219 |
| 8.1. Представление последовательностей | 220 |
| 8.2. Случайные последовательности: функции <i>rand</i> , <i>randn</i> , <i>xcorr</i> , <i>xcov</i> | 244 |
| ГЛАВА 9. ЛИНЕЙНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ..... | 257 |
| 9.1. Моделирование линейных дискретных систем во временной области ... | 257 |
| 9.2. Моделирование линейных дискретных систем в z-области | 285 |
| 9.3. Моделирование линейных дискретных систем в частотной области..... | 302 |
| ГЛАВА 10. СТРУКТУРЫ ЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ..... | 313 |
| 10.1. Разновидности структур КИХ- и БИХ-систем..... | 313 |
| 10.2. Описание структур КИХ- и БИХ-систем в виде объектов <i>dfilt</i> | 318 |
| 10.3. Функции MATLAB для объектов <i>dfilt</i> | 325 |
| 10.4. Расстановка звеньев и масштабирование в объектах <i>dfilt</i> : функции <i>sos</i> , <i>scale</i> | 332 |
| ГЛАВА 11. ДИСКРЕТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ | 339 |
| 11.1. Вычисление ДПФ: функции <i>fft</i> , <i>ifft</i> , <i>fftshift</i> ; внешние функции <i>fft_e1</i> , <i>fft_e2</i> | 342 |

| | |
|---|------------|
| 11.2. Вычисление свертки с помощью ДПФ: функция <i>fftfilt</i> ; внешняя функция <i>iir_iir</i> | 356 |
| 11.3. Вычисление свертки с секционированием: функция <i>fftfilt</i> | 363 |
| ГЛАВА 12. ОБРАБОТКА СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ ЛИНЕЙНЫМИ ДИСКРЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ | 367 |
| 12.1. Формирование случайных сигналов с заданным законом распределения вероятностей | 367 |
| 12.2. Формирование случайных сигналов с заданной корреляционной функцией..... | 370 |
| 12.3. Непараметрические методы спектрального анализа: функции <i>wvtool</i> , <i>psd</i> | 371 |
| 12.4. Линейное предсказание: функция <i>lpc</i> | 381 |
| 12.5. Параметрические методы спектрального анализа: функции <i>pcov</i> , <i>arcov</i> , <i>pmcov</i> , <i>armcov</i> , <i>pburg</i> , <i>arburg</i> , <i>pyulear</i> , <i>aryule</i> | 387 |
| ГЛАВА 13. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРОВ | 391 |
| 13.1. Цифровые фильтры | 391 |
| 13.2. Свойства КИХ-фильтров | 393 |
| 13.3. Задание требований к частотным характеристикам КИХ-фильтров..... | 395 |
| 13.4. Синтез КИХ-фильтров методом окон: функции <i>fir1</i> , <i>kaiserord</i> ; внешние функции <i>check_low</i> , <i>check_high</i> , <i>check_pass</i> , <i>check_stop</i> , <i>plot_fir</i> | 400 |
| 13.5. Синтез КИХ-фильтров методом наилучшей равномерной (чебышевской) аппроксимации: функции <i>firpm</i> , <i>firpmord</i> , <i>firgr</i> ; внешняя функция <i>MAG_fir</i> | 417 |
| 13.6. Цифровой преобразователь Гильберта..... | 442 |
| 13.7. Цифровой дифференциатор..... | 449 |
| 13.8. Приведенная структура КИХ-фильтра: описание в виде объекта <i>dfilt</i> | 453 |
| 13.9. Анализ характеристик цифрового фильтра: функция <i>fvtool</i> | 456 |
| ГЛАВА 14. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРОВ | 457 |
| 14.1. Свойства БИХ-фильтров..... | 457 |
| 14.2. Задание требований к частотным характеристикам БИХ-фильтров и процедура синтеза..... | 458 |
| 14.3. Синтез аналоговых фильтров: функции <i>butter</i> , <i>cheby1</i> , <i>cheby2</i> , <i>ellip</i> , <i>buttord</i> , <i>cheb1ord</i> , <i>cheb2ord</i> , <i>ellipord</i> , <i>freqs</i> | 460 |
| 14.4. Синтез БИХ-фильтров методом инвариантности импульсной характеристики: функции <i>impinvar</i> , <i>impz</i> | 463 |

| | |
|---|------------|
| 14.5. Синтез БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования: функции <i>bilinear</i> , <i>butter</i> , <i>cheby1</i> , <i>cheby2</i> , <i>ellip</i> , <i>butterd</i> , <i>cheb1ord</i> , <i>cheb2ord</i> , <i>ellipord</i> | 469 |
| 14.6. Структура БИХ-фильтра: описание в виде объекта <i>dfilt</i> | 480 |
| 14.7. Описание требований к АЧХ КИХ- и БИХ-фильтров в виде объектов <i>fdesign</i> | 481 |
| 14.8. Синтез КИХ- и БИХ-фильтров в виде объектов <i>dfilt</i> на основе объектов <i>fdesign</i> | 486 |
| ГЛАВА 15. АДАПТИВНАЯ ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ..... | 493 |
| 15.1. Применение принципов адаптации в системах ЦОС..... | 493 |
| 15.2. Адаптивный алгоритм LMS: функции <i>lms</i> и <i>nlms</i> для объектов <i>adaptfilt</i> | 499 |
| 15.3. Адаптивный алгоритм RLS: функция <i>rls</i> для объекта <i>adaptfilt</i> | 504 |
| ГЛАВА 16. КВАНТОВАНИЕ В СИСТЕМАХ ЦОС С ФИКСИРОВАННОЙ ТОЧКОЙ ... | 513 |
| 16.1. Эффекты квантования в структуре цифрового фильтра..... | 515 |
| 16.2. Моделирование структуры цифрового фильтра с фиксированной точкой..... | 542 |
| 16.3. Анализ характеристик КИХ- и БИХ-фильтров с ФТ | 566 |
| 16.4. Моделирование квантования в АЦП | 581 |
| 16.5. Вычисление реакции КИХ- и БИХ-фильтров с ФТ: функция <i>filter</i> | 601 |
| ГЛАВА 17. МНОГОСКОРОСТНЫЕ СИСТЕМЫ ЦОС | 618 |
| 17.1. Однократные системы интерполяции..... | 619 |
| 17.2. Моделирование однократной интерполяции в MATLAB: функции <i>interp</i> , <i>upfirdn</i> | 624 |
| 17.3. Однократные системы децимации | 629 |
| 17.4. Моделирование однократной децимации в MATLAB: функции <i>decimate</i> , <i>upfirdn</i> | 635 |
| 17.5. Системы однократной передискретизации | 638 |
| 17.6. Моделирование однократной передискретизации в MATLAB: функции <i>resample</i> , <i>upfirdn</i> | 639 |
| 17.7. Описание полифазной структуры систем интерполяции и децимации в виде объектов <i>mfilt</i> | 642 |
| ГЛАВА 18. ВЕЙВЛЕТ-ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ | 651 |
| 18.1. Основные понятия вейвлет-анализа..... | 652 |
| 18.2. Вейвлеты в системе MATLAB: функции <i>wavemngr</i> , <i>waveinfo</i> , <i>wavefun</i> , <i>centfrq</i> | 655 |

| | |
|--|------------|
| 18.3. Непрерывное вейвлет-преобразование: функция <i>cwt</i> | 667 |
| 18.4. Масштабирующие фильтры: функции <i>dbwavf</i> , <i>symwavf</i> , <i>coifwavf</i> , <i>biorwavf</i> , <i>rbiowavf</i> | 671 |
| 18.5. Фильтры разложения и восстановления: функции <i>orthfilt</i> , <i>wfilters</i> , <i>qmf</i> , <i>dwt</i> , <i>iwdt</i> | 672 |
| 18.6. Многоуровневый вейвлет-анализ: функции <i>wavedec</i> , <i>waverec</i> , <i>appcoef</i> , <i>detcoef</i> , <i>swt</i> , <i>iswt</i> | 680 |
| 18.7. Вейвлет-пакеты: функции <i>wpdec</i> , <i>wpccoef</i> , <i>wprec</i> , <i>wentropy</i> , <i>besttree</i> | 684 |
| Глава 19. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ СИГНАЛОВ..... | 690 |
| 19.1. Форматы данных, совместимые со средствами анализа сигналов в MATLAB | 690 |
| 19.2. Использование готовых сигналов: функция <i>wnoise</i> | 692 |
| 19.3. Импорт внешних файлов: функция <i>wavread</i> | 697 |
| 19.4. Воспроизведение звука: функции <i>sound</i> , <i>soundsc</i> , <i>wavplay</i> | 700 |
| 19.5. Запись звуковых файлов: функции <i>wavrecord</i> , <i>wavwrite</i> | 702 |
| Часть III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦОС СРЕДСТВАМИ GUI..... | 705 |
| Глава 20. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ СРЕДСТВАМИ GUI FDATool..... | 707 |
| 20.1. Синтез цифровых фильтров..... | 708 |
| 20.2. Входные параметры цифровых фильтров | 710 |
| 20.3. Примеры синтеза цифровых фильтров..... | 715 |
| 20.4. Выбор структуры цифрового фильтра..... | 721 |
| 20.5. Анализ цифровых фильтров | 722 |
| 20.6. Синтез цифровых преобразователей Гильберта | 724 |
| 20.7. Синтез цифровых дифференциаторов | 726 |
| 20.8. Сохранение цифровых фильтров на время сеанса в GUI FDA Tool..... | 728 |
| 20.9. Экспорт цифровых фильтров как объектов <i>dfilt</i> | 729 |
| 20.10. Импорт цифровых фильтров как объектов <i>dfilt</i> | 732 |
| 20.11. Моделирование структуры цифровых фильтров с фиксированной точкой | 733 |
| Глава 21. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СРЕДСТВАМИ GUI SPTool | 742 |
| 21.1. Синтез цифровых фильтров..... | 743 |
| 21.2. Входные параметры цифровых фильтров | 747 |

| | |
|--|------------|
| 21.3. Примеры синтеза цифровых фильтров..... | 750 |
| 21.4. Анализ цифровых фильтров..... | 755 |
| 21.5. Импорт входного сигнала..... | 756 |
| 21.6. Моделирование цифровой фильтрации..... | 760 |
| 21.7. Анализ сигналов во временной области..... | 761 |
| 21.8. Анализ сигналов в частотной области..... | 763 |
| 21.9. Экспорт данных из GUI SPTool..... | 766 |
| 21.10. Выход из GUI SPTool..... | 772 |
| Глава 22. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СРЕДСТВАМИ GUI ПАКЕТА WAVELET TOOLBOX..... | 773 |
| 22.1. Просмотр вейвлетов..... | 774 |
| 22.2. Одномерный дискретный вейвлет-анализ..... | 775 |
| 22.3. Одномерный пакетный вейвлет-анализ..... | 782 |
| 22.4. Вещественный и комплексный одномерный непрерывный вейвлет-анализ..... | 785 |
| 22.5. Удаление шума из стационарного случайного одномерного сигнала..... | 787 |
| 22.6. Оценка плотности распределения..... | 789 |
| 22.7. Оценка регрессии..... | 791 |
| 22.8. Отбор вейвлет-коэффициентов..... | 793 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 795 |
| ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ..... | 798 |

Предисловие

Современные тенденции в области телекоммуникаций в значительной мере связаны с разработкой цифровой аппаратуры и программного продукта, и это радикально меняет характер работы инженеров и научных работников — она все больше сводится к компьютерному моделированию. Особенностью устройств цифровой обработки сигналов (ЦОС) является то, что программные части данных устройств создаются непосредственно в процессе компьютерного моделирования, поэтому овладение его современными технологиями выдвигается на первый план. К таким технологиям, безусловно, относится программная среда (система) MATLAB, созданная компанией The Math Works, Inc. и предназначенная для компьютерного моделирования в различных областях науки и техники.

В последние годы дисциплина "Цифровая обработка сигналов" и ее модификации включены в общеобразовательные стандарты российских вузов. Замечательно, что все чаще издаются отечественные и переводные книги по теории ЦОС, ее приложениям и реализации алгоритмов ЦОС — "процесс пошел". Нередко теоретические разделы поддерживаются примерами расчета в MATLAB. Стали появляться книги прикладного характера, которые не фрагментарно, а целиком посвящены моделированию в MATLAB, например, книга Р. Гонсалеса и др. "Цифровая обработка изображений в MATLAB", издательство "Техносфера", 2006. Тем не менее на сегодняшний день спрос на литературу по моделированию ЦОС в MATLAB намного превышает предложение.

Это весьма обширная тема, и в предлагаемой книге затрагиваются *базовые* методы и алгоритмы ЦОС, теоретические основы которых изложены во многих источниках, в том числе и в учебном пособии этих же авторов "Основы цифровой обработки сигналов", издательство "БХВ-Петербург", 2005. (В ближайших планах его третье переиздание.) Сразу оговоримся, MATLAB — система необъятная, и даже в названной ограниченной области авторы никоим образом не претендуют на исчерпывающее описание возможностей MATLAB. Нюансы, тонкости и детали, равно как и разнообразие средств, предлагаемых для решения поставленных задач, можно постичь только на практике, привлекая мощную систему помощи MATLAB. Методика обучения компьютерному моделированию — особая. Фактически она сводится к самообучению — самостоятельному расширению знаний после приобрете-

ния начальных навыков, осваивания типовых приемов и определения вектора поисков в безбрежной системе MATLAB, которые в приложении к моделированию ЦОС в MATLAB постарались систематизировать и описать авторы. В книгу включено множество примеров — с их помощью, "без лишних слов", быстро осваивается технология моделирования. Для облегчения работы начинающим пользователям и замкнутого характера книги в нее включена первая часть, посвященная основам работы в MATLAB.

Данная книга может быть полезна для всех инженерно-технических работников, проявляющих интерес к области ЦОС, однако в первую очередь она ориентирована на студентов, аспирантов и преподавателей вузов и может быть рекомендована, в частности, для следующих обязательных дисциплин:

- Микропроцессоры и цифровая обработка сигналов (специальность 210405);
- Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры в системах подвижной связи (специальность 210402);
- Цифровая обработка аудиовидеосигналов (специальность 210312).

Предполагается, что читатели знакомы с основами теории ЦОС и с программированием на каком-либо языке высокого уровня. В книге даются лишь краткие теоретические справки по соответствующим разделам ЦОС.

Содержание книги включает 22 главы, которые тематически разделены на три части:

1. Введение в MATLAB.
2. Моделирование ЦОС программными средствами MATLAB.
3. Моделирование ЦОС средствами GUI.

Авторы частей и глав:

- А. И. Солонина — *часть I*; в *части II* главы 8—11, 13, 14, 16, 17; в *части III* главы 20, 21.
- С. М. Арбузов — в *части II* главы 12, 15, 18, 19; в *части III* — глава 22.

Алла Ивановна Солонина, проф., к. т. н., и Сергей Михайлович Арбузов, доц., к. т. н., преподают на кафедре "Цифровая обработка сигналов" Санкт-петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, возглавляемой Артуром Абрамовичем Ланнэ, проф., д. т. н.

Все предложения и замечания, которые будут приняты авторами с благодарностью, просим присылать в издательство "БХВ-Петербург" по электронному адресу: mail@bhv.ru.

Список сокращений на русском языке

- АФП — аналоговый фильтр-прототип;
- АЦП — аналого-цифровой преобразователь;
- АЧХ — амплитудно-частотная характеристика;
- БИХ — бесконечная импульсная характеристика (тип фильтра);
- БПФ — быстрое преобразование Фурье;
- ВЦД — высокочастотный цифровой дифференциатор;
- ГВЗ — групповое время задержки;
- ДПФ — дискретное преобразование Фурье;
- ИХ — импульсная характеристика;
- КИХ — конечная импульсная характеристика (тип фильтра);
- ЛДС — линейная дискретная система;
- ЛФЧХ — линейная ФЧХ;
- МНК — метод наименьших квадратов;
- ННУ — нулевые начальные условия;
- НЦД — низкочастотный цифровой дифференциатор;
- ОДПФ — обратное дискретное преобразование Фурье;
- ОДУ — обыкновенные дифференциальные уравнения;
- ПЗ — полоса задерживания;
- ПП — полоса пропускания;
- ПТ — плавающая точка;
- ПФ — полосовой фильтр;
- ПЦД — полосовой цифровой дифференциатор;
- РУ — разностное уравнение;

РФ — режекторный фильтр;

СЛАУ — система линейных алгебраических уравнений;

СПМ — спектральная плотность мощности;

ФВЧ — фильтр верхних частот;

ФНЧ — фильтр нижних частот;

ФТ — фиксированная точка;

ФЧХ — фазочастотная характеристика;

ЦД — цифровой дифференциатор;

ЦОС — цифровая обработка сигналов;

ЦПГ — цифровой преобразователь Гильберта;

ЦПОС — цифровой процессор обработки сигналов;

ЦФ — цифровой фильтр;

ШЦД — широкополосный цифровой дифференциатор.

Список сокращений на английском языке

DFT — Discrete Fourier Transform (Дискретное преобразование Фурье);

EXT — Extension (Расширение);

FFT — Fast Fourier Transform (Быстрое преобразование Фурье);

FIR — Finite Impulse Response (Конечная импульсная характеристика);

GUI — Graphic User Interface (Графический интерфейс пользователя);

HTML — Hyper Text Markup Language (Язык гипертекстовой маркировки);

IDFT — Inverse Discrete Fourier Transform (Обратное дискретное преобразование Фурье);

IFFT — Inverse Fast Fourier Transform (Обратное быстрое преобразование Фурье);

IIR — Infinite Impulse Response (Бесконечная импульсная характеристика);

LMS — Least Mean-Square (Метод наименьших квадратов);

LSBs — Least Significant Bits (Младшее слово);

MAC — Multiplier/Accumulator (Умножение с накоплением);

MSBs — Most Significant Bits (Старшее слово);

NLMS — Normalize Least Mean-Square (Нормализованный метод наименьших квадратов);

ODE — Ordinary Differential Equations (Обыкновенные дифференциальные уравнения);

PDF — Portable Document Format (Формат переносного документа);

PSD — Power Spectral Density (Спектральная плотность мощности);

RLS — Recursive Least Square (Рекурсивный метод наименьших квадратов).



ЧАСТЬ I

ВВЕДЕНИЕ В MATLAB

Для замкнутого характера книги в нее включена первая часть, посвященная основам MATLAB. Широко привлекая работы В. П. Дьяконова, В. Г. Потемкина, Ю. Ф. Лазарева, Ю. Л. Кеткова, И. Е. Ануфриева и др., авторы постарались отобрать и систематизировать материал и в ряде случаев, принимая в расчет основного читателя — студента, снабдить его краткими математическими комментариями. Для более подробного знакомства с MATLAB следует обратиться к работам указанных авторов и системе помощи MATLAB.

Те, кто знаком с работой в MATLAB, смогут воспользоваться материалом этой части как справочником при чтении книги и решении собственных задач.

Изложение материала книги ориентировано на версию MATLAB 7.0 (Release 14), которая в части моделирования цифровой обработки сигналов принципиально не отличается от последней на настоящий момент (декабрь 2007 года) версии MATLAB 7.5 (Release 2007b).

ГЛАВА 1



Знакомство с системой MATLAB

Система MATLAB (или коротко *MATLAB*) — это интерактивная система (диалог человек ↔ компьютер), предназначенная для компьютерного моделирования практически в любой области науки и техники.

В узком смысле MATLAB определяют как систему, предназначенную для автоматизации математических расчетов.

Система MATLAB была создана в США компанией The MathWorks, Inc., и ее разработка для персональных компьютеров была представлена в начале 80-х годов XX в. Информация о MATLAB доступна на сайтах www.mathworks.com, www.softline.ru, www.matlab.ru и www.exponenta.ru.

Особенностью системы MATLAB, которая, не в последнюю очередь, обеспечила ей широкую популярность в мире, является то, что для работы в MATLAB "можно знать ровно столько, сколько нужно", имея в виду, что для работы в MATLAB достаточно кратких сведений о системе и ее возможностях по решению конкретной задачи. Нередко пользователи этим ограничиваются. Однако большинство из них, почувствовав дружественную среду и колоссальные возможности MATLAB, стремится расширить свои знания, и здесь чрезвычайно важно умело "проложить курс" — систематизировать поток информации, относящейся к заданному направлению исследований, и в его рамках освоить технологию и средства компьютерного моделирования. Эта непростая для начинающих задача стимулировала написание книжководств по применению MATLAB для различных приложений. Среди них на настоящий момент одним из наиболее актуальных является цифровая обработка сигналов (ЦОС).

Математический аппарат MATLAB ориентирован на обработку матриц, что является отличительным признаком и преимуществом данной системы, позволяющим организовывать простейшую циклическую обработку данных без составления программы. Отсюда и название системы — сокращение от англ. MATrix LABoratory.

Другое важнейшее преимущество MATLAB — это богатейшая библиотека встроенных функций (около 900) самого разного назначения, в том числе обеспечивающих многообразие графического вывода результатов. Систему MATLAB можно назвать коллекцией современных численных методов, постоянно расширяющейся, в том числе собственными (внешними) функциями пользователя. К расширению системы привлечены крупнейшие научные школы мира в области математики, программирования и специальных отраслей.

Для создания программ в MATLAB разработан алгоритмический язык высокого уровня. В определенном смысле, благодаря матричному представлению данных и мощной библиотеке встроенных функций, он превосходит традиционные языки, и поэтому его часто называют *языком сверхвысокого уровня*.

На базе библиотеки встроенных функций в MATLAB созданы стандартные программы GUI (Graphic User Interface — графический интерфейс пользователя) — средства моделирования без использования языка MATLAB в явном виде, что весьма удобно и в ряде случаев достаточно.

Особое место в MATLAB занимает ее подсистема Simulink — средства блочного моделирования также без использования языка MATLAB в явном виде с возможностью отслеживания процесса обработки данных во времени. На основе моделей Simulink могут создаваться программные части устройств ЦОС, реализуемые на процессорах цифровой обработки сигналов, в частности, TMS320C2000 и TMS320C6000 фирмы Texas Instruments. Этой обширной теме авторы предполагают посвятить свою следующую книгу.

1.1. Принятые обозначения

Для удобства чтения в тексте книги использованы следующие шрифты:

□ Times New Roman полужирный — для следующих обозначений:

- названий окон, например, окно **Command Window**;
- пунктов меню, например, пункт меню **File**;

- команд в пунктах меню, например, команда **Set Path** в пункте меню **File**;
 - кнопок, например, кнопка **New Design**;
 - вкладок, например, вкладка **Index**;
 - полей, групп, раскрывающихся списков и т. п. в окнах, например, раскрывающийся список **Magnitude** в окне **Filter Viewer**;
 - файлов при работе в GUI, например, файл **filt3** с данными о синтезированном фильтре;
- Courier New — для выделения:
- вводимого и выводимого текстов в окне **Command Window**, например, команда `sptool`;
 - папок MATLAB, например, папка `work`;
- Courier New полужирный — для описания форматов команд, функций и операторов MATLAB, например, формат встроенной функции `residuez`:
`[r, p, c]=residuez(num, den)`
- *курсив* — для выделения ключевых слов или определений, например, "Элементы вектора представляет собой *слитную* запись символов".

MATLAB не имеет русифицированной версии, поэтому при первом упоминании имени окон, пунктов меню, команд в пунктах меню, кнопок, вставок и т. п. в скобках дается их перевод.

1.2. Установка и запуск MATLAB

Система MATLAB 7.0 — это мощный программный комплекс, состоящий из *четырёх компонентов*: MATLAB, Simulink, Toolbox и Blockset, общим объемом порядка 1500—2500 Мбайт (в зависимости от комплектации), размещаемый на двух CD-дисках. Первый из них содержит системные файлы, а второй — справочную документацию (файлы в формате HTML). В отличие от предшествующих версий, MATLAB 7.0 не поддерживается справочной документацией в формате PDF на CD-диске — электронными книгами — их объем потребовал бы, как минимум, еще одного диска. Документация в этом формате доступна на сайте **www.mathworks.com**.

Компонент *MATLAB* представляет собой ядро системы — *ядро MATLAB*.

Компонент *Simulink* фактически является подсистемой MATLAB, предназначенной для блочного моделирования, однако, благодаря своим уникальным возможностям, этот компонент часто воспринимают как самостоятельную систему и называют *ядром Simulink*.

Компоненты *Toolbox* (Набор инструментов) и *Blockset* (Набор блоков) — это так называемые *пакеты расширения* MATLAB и Simulink соответственно. Они сгруппированы по специализированным приложениям, назначение которых отображаются в их названиях. В состав MATLAB 7.0 входит около 80-ти пакетов расширения.

Установка MATLAB не представляет сложности и выполняется в соответствии с указаниями. При установке MATLAB пользователь может *самостоятельно формировать ее состав* на своем компьютере из интересующих его пакетов расширения, помечаемых флажком в окне **Product and Folder Selection** (Выбор пакетов и папок) в раскрывающемся списке **Select Products to install** (Выбор пакетов для инсталляции). Исключение составляет обязательное ядро MATLAB и ядро Simulink (если предполагается его использовать).

При желании легко расширить состав системы, для этого следует повторить процедуру установки, помечая флажком дополнительные пакеты расширения.

Второй CD-диск устанавливается по указанию инсталлятора: "Enter Next CD".

Для широкого круга задач, решаемых методами цифровой обработки, линейной и нелинейной, помимо ядер MATLAB и Simulink, рекомендуется включить пакеты расширения MATLAB (Toolbox) и Simulink (Blockset), перечисленные в табл. 1.1. Пакеты, относящиеся к Simulink, выделены серым цветом.

Таблица 1.1. Рекомендуемые для установки пакеты расширения MATLAB

| Название пакета | Назначение пакета |
|-------------------------|-----------------------------|
| MATLAB | Ядро MATLAB |
| Simulink | Ядро Simulink |
| Communications Blockset | Системы связи |
| Communications Toolbox | Системы связи |
| Control System Toolbox | Системы управления |
| Curve Fitting Toolbox | Приближение кривых и данных |

Таблица 1.1 (окончание)

| Название пакета | Назначение пакета |
|----------------------------------|--|
| Dials and Gauges Blockset | Измерительные приборы |
| Embedded Target for TI C2000 DSP | Встроенный пакет для TMS320C2000 |
| Embedded Target for TI C6000 DSP | Встроенный пакет для TMS320C6000 |
| Filter Design Toolbox | Проектирование цифровых фильтров |
| Fixed Point Toolbox | Обработка данных с фиксированной точкой (ФТ) |
| Neural Network Toolbox | Нейронные сети |
| Optimization Toolbox | Методы оптимизации |
| Real-Time Windows Target | Пакет на базе Windows для реального времени |
| Signal Processing Blockset | Обработка сигналов |
| Signal Processing Toolbox | Обработка сигналов |
| Simulink Control Design | Системы управления |
| Simulink Fixed Point | Обработка данных с ФТ |
| Spline Toolbox | Сплайн-функции |
| Statistics Toolbox | Методы математической статистики |
| Symbolic Math Toolbox | Обработка символьных данных |
| System Identification Toolbox | Методы идентификации |
| Wavelet Toolbox | Вейвлет-функции |

По завершении установки MATLAB на **Рабочем столе** автоматически создается ярлык MATLAB — эмблема в виде трехмерного графика. Для запуска MATLAB достаточно щелкнуть на этом ярлыке.

1.3. Интерфейс MATLAB

Интерфейс MATLAB соответствует интерфейсу современных Windows-приложений. Запуск MATLAB приводит к появлению фирменной заставки, после

чего автоматически открывается окно **MATLAB**, представляющее собой *комбинацию окон* (рис. 1.1), благодаря чему обеспечивается оперативное взаимодействие пользователя с различными компонентами системы MATLAB.

Интерфейс **MATLAB** образуют следующие окна.

- ❑ **Command Window** (Командное окно) — это *основное окно* интерактивной системы MATLAB, в котором, условно говоря, пользователь "задает вопрос" на языке MATLAB, а система "дает на него ответ".

Язык MATLAB будет изучаться в следующих главах, а пока отметим лишь три момента:

- признаком того, что система "готова принять вопрос", является символ:
 >>
 в начале строки, которую называют *командной*;
- пользователь "задает вопрос" (вводит текст) в командной строке, нажимая в конце клавишу <Enter>;
- строка (строки), в которой система "дает ответ", никак в начале строки не помечается.

- ❑ **Command History** (История команд) — в этом окне выводится построчный список "ранее заданных вопросов", в том числе ошибочных, сохраняемых после выхода из системы MATLAB, в отличие от "ранее данных ответов", которые не сохраняются.

Это позволяет как при запуске MATLAB, так и в ходе работы повторять ранее заданные "вопросы", для чего в окне **Command History** достаточно дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на соответствующем "вопросе". Можно перетащить "вопрос" (или группу выделенных "вопросов") в окно **Command Window** и выполнить другие операции с "вопросами", обращаясь к контекстному меню окна **Command History**, которое открывается, как обычно, щелчком правой кнопки мыши.

- ❑ **Current Directory** (Текущая папка) — в этом окне выводится содержимое папки, имя которой отображается в раскрывающемся списке **Current Directory** на панели инструментов окна **MATLAB**. По умолчанию, текущей считается папка со стандартным именем *work*, предназначенная для хранения файлов и папок, создаваемых пользователем.

В окне **Current Directory** имеется *две вкладки* — **Current Directory** и **Workspace**. При открытии вкладки **Workspace** отрывается следующее окно.

- **Workspace** (Рабочая область памяти) — в этом окне выводится список текущих переменных, сохраняемых в рабочей области памяти **Workspace** до выхода из MATLAB или их удаления по соответствующей команде.

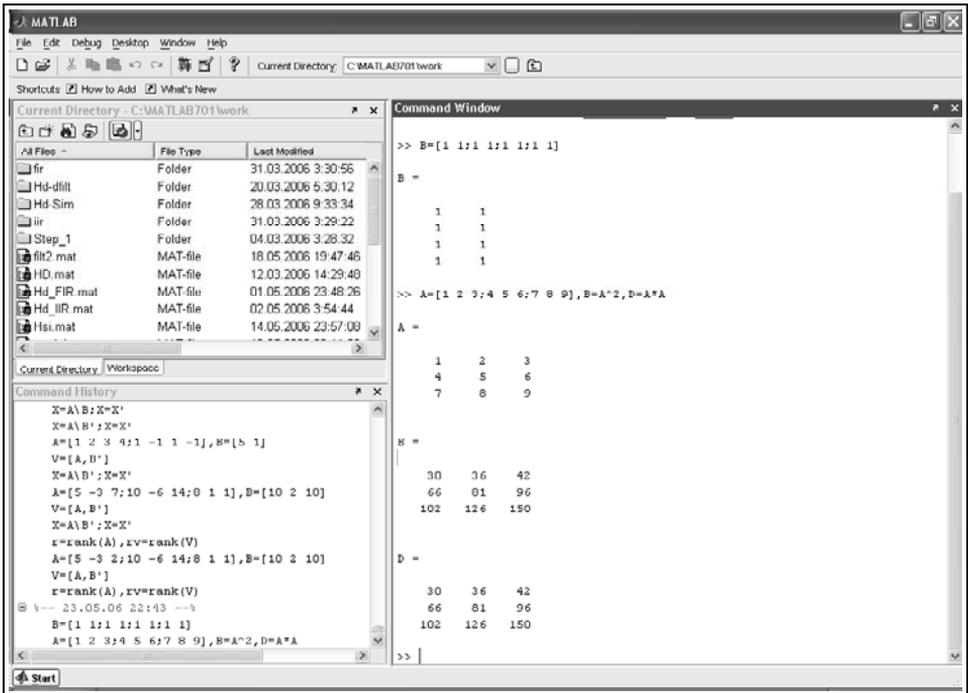


Рис. 1.1. Окно MATLAB

Главное меню окна **MATLAB** является *контекстно-зависимым* от того, какая из вкладок **Current Directory** или **Workspace** открыта. Многие из пунктов этого меню и их команды типичны для интерфейса Windows и не требуют комментариев либо легко осваиваются интуитивно, другие будут рассмотрены в рамках соответствующих тем. Пока лишь отметим общее назначение команд в пунктах меню окна **MATLAB**:

- **File** (Файл) — команды предназначены для работы с файлами пользователя;
- **Graphics** (Графика) — при открытой вкладке **Workspace** команды предназначены для реализации обширных средств графики при работе в текущем графическом окне;

- **View** (Вид) — при открытой вкладке **Workspace** команды предназначены для просмотра содержимого рабочей области памяти **Workspace**, а при открытой вкладке **Current Directory** — для просмотра папок;
- **Debug** (Отладка) — команды предназначены для работы в режиме программирования;
- **Desktop** (Стол) — команды предназначены для организации окна **MATLAB**, в частности:
 - команды **Desktop Layout – Command Window Only** (Организация Стола – Только Командное окно) позволяют получить вид окна **MATLAB**, соответствующий версии MATLAB 5.3 с единственным окном **Command Window**;
 - команды **Desktop Layout – Default** (Организация стола – Исходная) возвращают окно **MATLAB** в исходное состояние, устанавливаемое по умолчанию при запуске MATLAB и т. д.;
- **Window** (Окно) — содержит список открытых окон для их быстрой активизации;
- **Help** (Помощь) — команды предназначены для обращения к системе помощи MATLAB и другим вспомогательным средствам.

Вывод информации о версии MATLAB и включенных пользователем при установке пакетах расширения выполняется в окне **Command Window** по команде `ver`¹.

1.4. Система помощи MATLAB

Система помощи MATLAB представляет собой совокупность следующих средств помощи пользователю:

- электронные справочные системы, а именно:
 - *Встроенная справочная система* — формируется *автоматически* при установке системы MATLAB, исходя из ее состава, определяемого пользователем. Она является *информативно наиболее краткой* и содержит иллюстративные примеры, которые можно копировать и выполнять;

¹ Язык MATLAB будет изучаться в следующих главах, однако уже в этой главе познакомимся с тремя командами — `ver`, `help` и `demo`.

- *Справочная система в формате HTML* (Hyper Text Markup Language — язык гипертекстовой маркировки) — *автономна* по отношению к системе MATLAB и содержится на втором CD-диске. Ее состав определяется пользователем при установке, подобно системе MATLAB, и, вообще говоря, может не совпадать с составом установленных пакетов расширения.

Эта справочная система *информативно более полная*, чем Встроенная справка. В нее также включены иллюстративные примеры, где необходимо — с графическим выводом результатов, однако копировать их нельзя;

- *Справочная система в формате PDF* (Portable Document Format — формат переносного документа) — также *автономна* по отношению к системе MATLAB. В комплекте MATLAB 7.0 и последующих версиях она на CD-диск не предоставляется, но доступна на сайте **www.mathworks.com**. Для чтения в формате PDF необходимо установить программу Acrobat Reader.

Эта справочная система *информативно наиболее полная* и представляет собой так называемые "*электронные книги*", а точнее — серии книг, где каждая серия посвящена некоей общей теме, а входящие в ее состав книги — конкретным вопросам в рамках данной темы. Подобно обычным книгам, электронные книги разбиты на главы и параграфы. Там, где это необходимо, справке по MATLAB с обязательными иллюстративными примерами предшествуют сведения теоретического характера со ссылками на литературу;

□ демонстрационные примеры.

В состав MATLAB включен значительный *список демонстрационных примеров*, которые в наглядной форме с привлечением эффектных графических средств позволяют составить представление о возможностях MATLAB в решении самых разных задач.

Рассмотрим *обращение* к системе помощи MATLAB.

1.4.1. Команда *help*

Команда `help` обеспечивает обращение к *Встроенной справочной системе* и имеет формат:

```
help <содержательная часть>
```

где *<содержательная часть>* — стандартное имя объекта MATLAB: команды, функции и т. п., может отсутствовать.

Здесь и далее треугольные скобки (<) и (>), как обычно, используют для условных обозначений на русском языке; в формате команды треугольные скобки вместе с содержимым заменяются тем, что указывается в каждом конкретном случае.

Например, выведем справку о функции синус:

```
>> help sin
SIN      Sine.
        SIN(X) is the sine of the elements of X.
        See also asin, sind.
        Overloaded functions or methods (ones with the same name in
other directories)
        help sym/sin.m
        Reference page in Help browser
        doc sin
```

Список всех папок с информацией об установленных пользователем компонентах MATLAB выводится по команде `help` без содержательной части:

help

Справка о содержимом конкретной папки выводится по команде:

help <имя папки>

Выведем содержимое папки `matlab`, к которой мы будем неоднократно обращаться в первой части книги:

```
>> help matlab
matlab\ops           - Operators and special characters.
matlab\general       - General purpose commands.
matlab\lang          - Programming language constructs.
matlab\elmat         - Elementary matrices and matrix manipulation.
matlab\elfun         - Elementary math functions.
matlab\specfun       - Specialized math functions.
matlab\matfun        - Matrix functions - numerical linear algebra.
matlab\datafun       - Data analysis and Fourier transforms.
matlab\polyfun       - Interpolation and polynomials.
matlab\funfun        - Function functions and ODE solvers.
matlab\sparfun       - Sparse matrices.
```

| | |
|---|---|
| <code>matlab\scribe</code> | - Annotation and Plot Editing. |
| <code>matlab\graph2d</code> | - Two dimensional graphs. |
| <code>matlab\graph3d</code> | - Three dimensional graphs. |
| <code>matlab\specgraph</code> | - Specialized graphs. |
| <code>matlab\graphics</code> | - Handle Graphics. |
| <code>matlab\uitools</code> | - Graphical user interface tools. |
| <code>matlab\strfun</code> | - Character strings. |
| <code>matlab\imagesci</code> | - Image and scientific data input/output. |
| <code>matlab\iofun</code> | - File input and output. |
| <code>matlab\audiovideo</code> | - Audio and Video support. |
| <code>matlab\timefun</code> | - Time and dates. |
| <code>matlab\datatypes</code> | - Data types and structures. |
| <code>matlab\verctrl</code> | - Version control. |
| <code>matlab\codetools</code> | - Commands for creating and debugging code. |
| <code>matlab\helptools</code> | - Help commands. |
| <code>matlab\winfun</code> (COM/DDE) | - Windows Operating System Interface Files |
| <code>matlab\demos</code> | - Examples and demonstrations. |

В папке `matlab` имеется папка `demos` (она выделена полужирным шрифтом), хранящая *список демонстрационных примеров*, который выводится по команде:

```
help demos
```

1.4.2. Пункт меню *Help*

Пункт меню **Help** в окне **MATLAB** обеспечивает обращение к *Справочной системе в формате HTML* и к демонстрационным примерам.

Пункт меню **Help** содержит следующие команды:

- Full Product Family Help** (Помощь по всей системе);
- MATLAB Help** (Помощь по ядру MATLAB);
- Using the Desktop** (Использование стола Desktop);
- Using the Command Window** (Использование окна Command Window);
- Web Resources** (Выход в Интернет);

- ❑ **Check for Updates** (Поиск обновлений);
- ❑ **Demos** (Демонстрационные примеры);
- ❑ **About MATLAB** (О системе MATLAB).

Назначение команд определяется их названием. В целом, организация помощи по данным командам не представляет сложности и легко осваивается самостоятельно. Остановимся коротко на одной, главной, команде этого меню и поясним необходимые действия для получения справки.

По команде меню **Help | Full Product Family Help** открывается окно **Help** — окно Справочной системы в формате HTML, разделенное на две части — два окна (рис. 1.2):

- ❑ левое окно **Help Navigator** (Навигатор в помощи);
- ❑ правое окно (без названия) с раскрывающимся списком **Title** (Заголовок).

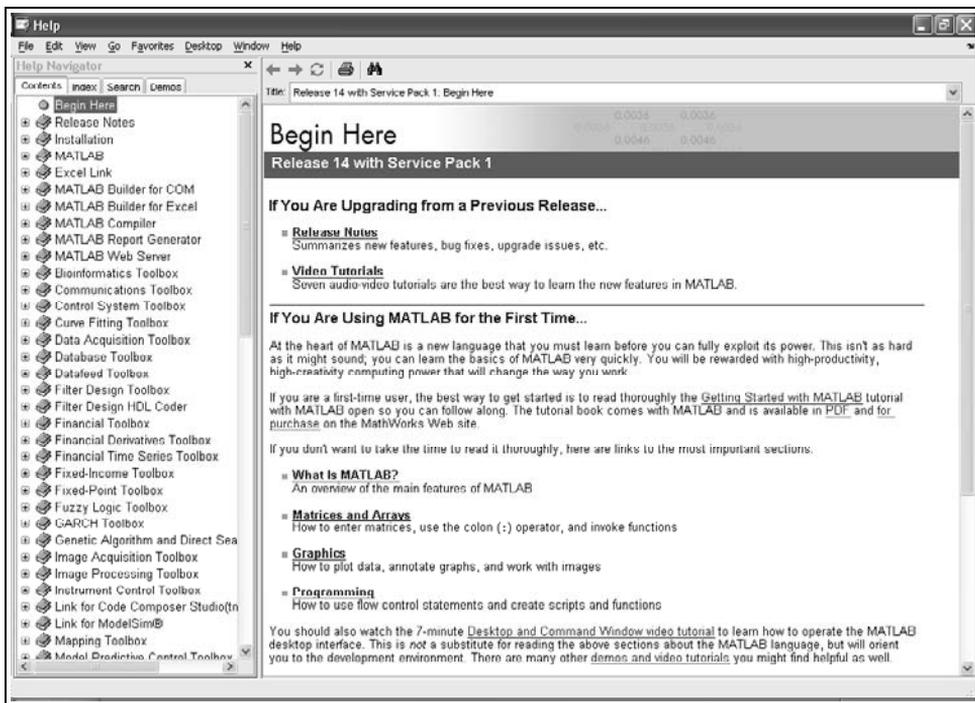


Рис. 1.2. Окно **Help** Справочной системы в формате HTML с открытой вкладкой **Contents**

Левое окно **Help Navigator** содержит *четыре* вкладки:

- **Contents** (Содержание) — при открытии этой вкладки, в *левом* окне выводится дерево, узлы которого отображают установленные пользователем разделы Справочной системы в формате HTML, а в *правом* — HTML-страница, соответствующая разделу, выделенному в левом окне. Последовательно раскрывая разделы в левом окне, легко отыскать интересующий вас объект, справка по которому автоматически открывается в правом окне (рис. 1.2).
- **Index** (Индекс) — при открытии этой вкладки, в *левом* окне отображается список ключевых слов в алфавитном порядке с гипертекстовыми ссылками, а в *правом* — HTML-страница справочной системы, соответствующая активизированной гипертекстовой ссылке, которая отображается в поле ввода **Search index for** (Найти по индексу) левого окна (рис. 1.3).

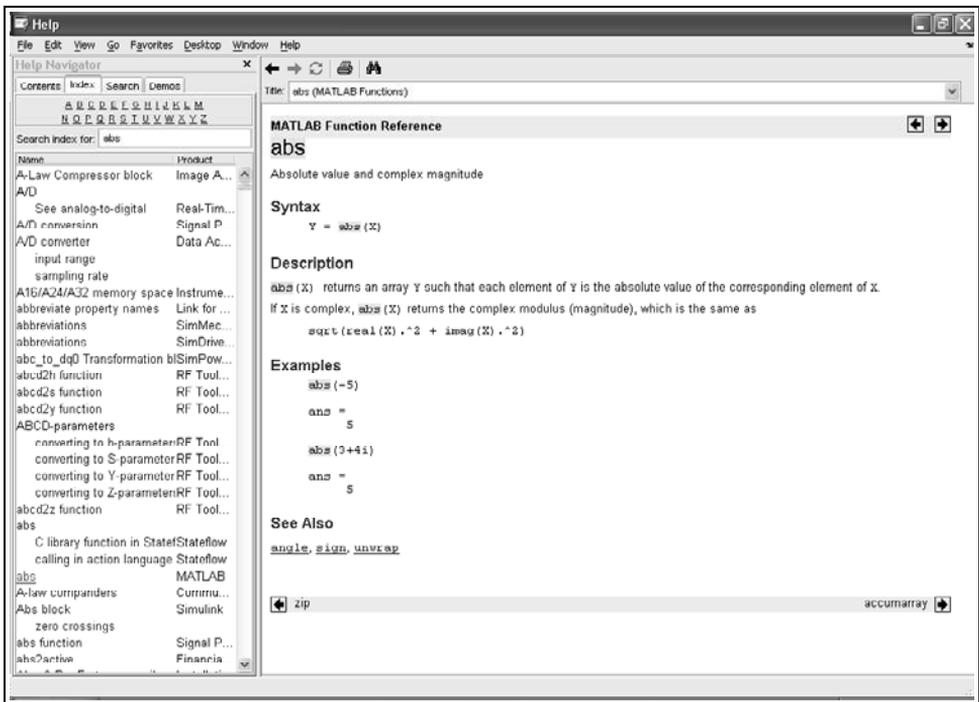


Рис. 1.3. Окно **Help** Справочной системы в формате HTML с открытой вкладкой **Index** и активизированной гипертекстовой ссылкой **abs**