



Дьяконов В. П.



MATLAB 6.5 SP1 / 7.0 Simulink 5 / 6

**Обработка сигналов
и проектирование фильтров**

Все для профессиональной работы с сигналами и фильтрами
Signal Processing Toolbox и Blockset, Digital Processing, Filter Design Toolbox
Впервые — описание RF Toolbox, RF Blockset и Filter Design HDL Coder
Использование Wavelet Toolbox 2 / 3
Совместная работа с PC-Lab 2000

Подборка демонстрационных примеров!!!

**Библиотека
Профессионала**

УДК 621.396.218
ББК 32.884.1
Д93

В. П. Дьяконов

Д93 MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. — М.: СОЛОН-Пресс, 2010. — 576 с.: ил. — (Серия «Библиотека профессионала»).

ISBN 5-98003-206-1

Третья книга в серии работ, посвященных двум последним реализациям мощных матричных систем компьютерной математики MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Впервые дан вводный курс по новейшей версии MATLAB 7 + Simulink 6. Описаны последние версии пакетов расширения по обработке сигналов и проектированию фильтров: Signal Processing Toolbox, Signal Processing Blockset, Digital Processing и Filter Design Toolbox. Впервые описаны пакеты расширения RF Toolbox и RF Blockset по расчету и проектированию радиочастотных цепей, устройств и систем и пакет Filter Design HDL Coder, создающий коды для программирования больших интегральных микросхем фильтров. Дано описание последних версий пакета Wavelet Toolbox 2*/3 по вейвлетам и вейвлет-преобразованиям. Для всех пакетов, наряду с функциями командного режима, описан интерактивный и визуально-ориентированный инструментальный на основе графического интерфейса пользователя (GUI), справка и наиболее показательные демонстрационные примеры. Описана работа с MATLAB виртуальной лаборатории PC-Lab 2000 для анализа, обработки и представления реальных сигналов.

Для научных работников, инженеров, студентов, аспирантов и преподавателей университетов и вузов.

УДК 621.396.218
ББК 32.884.1

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-Пресс» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из двух способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20.
2. Передать заказ по электронной почте на адрес: magazin@solon-r.ru.

Бесплатно высылается каталог издательства по почте.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно дополнительно указать свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-Пресс». Для этого надо послать пустое письмо на робот-автоответчик по адресу: katalog@solon-r.ru.

Получать информацию о новых книгах нашего издательства вы сможете, подписавшись на рассылку новостей по электронной почте. Для этого пошлите письмо по адресу: news@solon-r.ru. В теле письма должно быть написано слово SUBSCRIBE.

ISBN 5-98003-206-1

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2010
© В. П. Дьяконов, 2010

Глава 2

Создание и обработка сигналов

Эта глава посвящена описанию возможностей основного пакета расширения по обработке сигналов и изображений Signal Processing Toolbox. Здесь описаны особенности задания сигналов различного типа и типовые методы обработки сигналов. Особое внимание уделено преобразованиям Фурье, в том числе оконным. Описаны средства получения спектров сигналов и построения спектрограмм и периодограмм.

2.1. Возможности пакета Signal Processing

2.1.1. Сигналы и их виды

Для передачи сообщений используются *сигналы*, которые представляют собой наложение сообщений на тот или иной носитель информации, способный быстро перемещать сигналы. Физическая природа сигналов может быть самой различной: ток в проводах, звуковые и электромагнитные волны или свет. Математически сигналы являются функциями — чаще всего функциями времени, но не обязательно. Например, сигналом может быть зависимость температуры или давления воздуха от высоты. Вопросам задания, описания и обработки сигналов посвящена обширная литература, например [26—57].

Сигналы могут быть аналоговыми (непрерывными) и дискретными, т. е. представляемыми дискретными уровнями. *Аналоговые сигналы* характеризуется плавным и непрерывным изменением их параметров, например величины электрического тока или напряжения для электрических сигналов. Примером такого сигнала является синусоидальный электрический сигнал:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi),$$

где U_m — амплитуда синусоидального сигнала; ω — круговая частота и φ — фаза.

Круговая частота связана с обычной частотой выражением

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi / T.$$

Частота f это число периодов T синусоидального сигнала в единицу времени (секунду или с). Она измеряется в герцах (Гц) — один герц это один период колебаний в секунду (единица названа в честь великого Герца, теоретически обосновавшего существование электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве). Синусоидальные сигналы относятся к классу *периодических сигналов*, для которых характерно соотношение $u(t) = u(t + T)$.

Фундаментальное значение синусоидального сигнала состоит в том, что этот сигнал является *стационарным*. Это значит, что его параметры U_m , ω и φ являются постоянными величинами. Этот сигнал определен во времени в пределах от $-\infty$ до $+\infty$. Он периодический, что означает равенство $u(t) = u(t + T)$ и симметричный, т. е. $u(t) = -u(-t)$.

Можно сказать, что синусоида описывает простейшее (а потому названное *гармоническим*) движение, параметры которого неизменны. Однако основные параметры этого сигнала могут непрерывно и плавно меняться во времени. Такое изменение называется *модуляцией* сигнала. Например, амплитудная модуляция описывается выражением:

$$u(t) = U_m(t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi),$$

где $U_m(t)$ — зависимость амплитуды от времени. Сигнал такого вида называется *амплитудно-модулированным*. Строго говоря, он является уже нестационарным и даже не синусоидальным.

Заметим, что синусоидальный сигнал может моделироваться еще и по частоте и по фазе. Этому соответствует *частотная модуляция* и *фазовая модуляция*, которые (как и их комбинация) широко используются на практике в радиотехнических системах. Все виды модуляции синусоидальных сигналов достаточно подробно описаны в учебной литературе по обработке сигналов, например в [34].

Аналоговые сигналы одного вида легко преобразуется в аналоговые сигналы другого вида. Например, микрофон преобразует звуковые колебания в электрические звуковые сигналы. Если звуковой сигнал синусоидальный, то сигнал на выходе микрофона будет синусоидальным напряжением с примесью некоторого шума $e(t)$:

$$u(t) = K_n \cdot A(t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) + e(t) = U_m(t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) + e(t),$$

где K_n — коэффициент преобразования силы звука в электрическое напряжение. Если $K_n = \text{const}$ и не зависит от уровня сигнала, то преобразование считается линейным. В ином случае оно будет нелинейным. При линейных преобразованиях форма синусоидального сигнала не меняется, хотя может возникнуть его сдвиг по фазе, определяющий временную задержку сигнала.

Самым неприятным моментом в использовании аналоговой информации является ее засоренность шумами самой различной природы. Все электронные компоненты имеют шумы, и они неизбежно усиливаются в ходе усиления и преобразования сигналов. Это принципиально препятствует точному копированию аналоговой информации.

На практике используется великое множество и несинусоидальных сигналов, например, импульсные сигналы пилообразной, прямоугольной и иной формы. К простейшим импульсным сигналам относятся единичный импульс и единичный перепад. *Единичный импульс* (он же дельта-функция $\sigma(t)$ или функция Дирака) это импульс с бесконечно малой длительностью, бесконечно большой амплитудой и площадью, равной 1. Такой импульс на практике неосуществим, но имеет важное значение при теоретическом анализе сигналов.

Единичный перепад (он же функция единичного скачка $\sigma(t)$ или функция Хевисада) имеет значение 0 при $t < 0$, 1/2 при $t = 0$ и 1 при $t > 0$. Часто ее задают выражением $y(t) = (t \geq 0)$, при котором значение функции в момент $t = 0$ равно 1, а не 1/2. В большинстве случаев это отличие не принципиально. Прямоугольный импульс с амплитудой A и длительностью T можно создать с помощью выражения $y(t) = A \cdot (\sigma(t) - \sigma(t - T))$.

Математик Фурье строго доказал, что периодические зависимости (сигналы) произвольной формы, удовлетворяющие условиям Дирихле (справедливым для реальных сигналов) могут быть представлены суммой синусоидальных компонент с кратной их частоте повторения частотой $k \cdot f_1$, где $k = 1, 2, \dots$ целое число и f_1 — частота повторения сигнала [26]. Эти компоненты называют *гармониками*,

а значение k — номерами гармоник. Синусоидальный сигнал с частотой f_1 есть *первая гармоника*, а сигналы с более высокими частотами называют *вышшими гармониками*.

К сожалению, в условиях всегда существующего ограничения числа гармоник точное представление сигналов с разрывами (и даже с разрывами производных) невозможно. В частности это обусловлено появлением *эффекта Гиббса* — возникновением характерных колебаний синтезированного по гармоникам сигнала [26]. Амплитуда колебаний достигает 9 % от величины перепада и даже 18 % от амплитуды *меандра* — симметричных прямоугольных импульсов. Похоже, что «эффект Гиббса» присущ и другим базисам представлений сигналов, например, он присутствует при вейвлет-преобразованиях сигналов [87].

Линейные преобразования сигналов не меняют состав гармоник, называемый *спектром*, а нелинейные приводят к его изменению, т. е. появлению новых гармоник.

Дискретные сигналы имеют ряд фиксированных уровней представления некоторых параметров. Чаще всего используются сигналы дискретные по времени, т. е. представленные в определенные моменты времени. Сигналы, мгновенные значения которых представлены числами, принято называть *цифровыми сигналами*.

Аналоговый сигнал можно *квантовать*, т. е. представлять его рядом ступенек, высота которых задается уровнем сигнала в начале каждой ступеньки (в момент *выборки*) и остается неизменной на протяжении каждой ступеньки. В общем случае производят *выборку* (вырезку) сигналов в определенные моменты времени. Они могут равномерно или неравномерно отстоять друг от друга. Выборку электрических сигналов и их представление в виде чисел или кодов конечной разрядности выполняют так называемые *аналого-цифровые преобразователи* — АЦП. В результате на выходе АЦП мы имеем дискретный сигнал, представленный потоком чисел (кодов). Главные показатели АЦП это их разрядность (число уровней квантования, обычно выражаемое в двоичном виде) и скорость выполнения преобразований (число операций в секунду).

Обратное преобразование цифровой информации в аналоговую выполняют *цифро-аналоговые преобразователи* — ЦАП. Для наиболее распространенных электрических сигналов АЦП и ЦАП выпускаются в виде больших интегральных микросхем. Основными параметрами АЦА и ЦАП является их разрядность (число двоичных разрядов) и допустимая скорость преобразования.

Важное значение имеет частота дискретизации сигналов. Согласно известной теореме Котельникова (за рубежом ее именуют теоремой об отсчетах или теоремой Найквиста) для сигналов со спектром, ограниченным частотой ω_b , частота дискретизации должна быть не менее $2\omega_b$. В этом случае дискретизированный аналоговый сигнал можно точно восстановить с помощью низкочастотного восстанавливающего фильтра (см. реализацию этого в разделе 2.4.8).

2.1.2. Задание сигналов средствами системы MATLAB

Как правило, непрерывные сигналы в системах компьютерной математики оказываются абстракцией. В них обычно задаются дискретные сигналы, определяемые в некоторые промежутки времени — чаще всего следующие с постоянным шагом. Для задания таких сигналов в системе MATLAB задается вектор времени, например:

```
t=0:1:10
```

Здесь задано 11 отсчетов времени от 0 до 10 с шагом 1. Одиночные (или одно-канальные) сигналы задается как:

```
y1=sin(t)           % Синусоидальный сигнал
y2=t                % Линейно нарастающий сигнал
y3=t.^2             % Квадратичный сигнал
y4=exp(-t)          % Экспоненциально спадающий сигнал
```

Каждый из этих сигналов представляется вектором, размер которого равен размеру вектора времени t . В MATLAB возможно и задание множественных (многоканальных) сигналов, например:

```
ym=[y1 y2 y3 y4] или ym=[sin(t) t t.^2 exp(-t)]
```

Такой сигнал представляется матрицей. Для моделирования шумов используется генератор случайных чисел с тем или иным законом распределения. Наиболее важные сигналы в пакете Signal Processing Toolbox задаются специальными функциями, хотя любой сигнал можно создать средствами MATLAB по подобию описанных выше сигналов.

2.1.3. Прохождение сигналов через искажающие устройства

Основная задача математического моделирования процесса прохождения сигналов через линейные искажающие (или преобразующие) их устройства (фильтры, усилители, каналы связи и т. д.) может решаться различными методами. При *спектральном подходе* к ее решению она представлена следующей диаграммой:

$$y_i(t) \rightarrow \text{ППФ} \rightarrow A_i(\omega), \varphi_i(\omega) \rightarrow \text{ИУ} \rightarrow A_0(\omega), \varphi_0(\omega) \rightarrow \text{ОПФ} \rightarrow y_o(t).$$

Исходный входной сигнал, представленный произвольной временной зависимостью $y_i(t)$ с помощью прямого преобразования Фурье (ППФ или DFT) преобразуется в свое частотное представление. Если сигнал периодический, то он представляется суммой дискретных гармоник с амплитудами $A_i(\omega)$ и фазами $\varphi_i(\omega)$, где i — номер гармоники от 0 (постоянная составляющая) до N , и $\omega = 2\pi f$ — круговая частота (f — частота в Гц). Наряду с обозначением ω нередко применяется обозначение ω . Первая гармоника имеет частоту повторения сигнала ω_1 , а высшие — частоты, кратные основной гармонике $i\omega_1$. Для непериодических сигналов спектр будет сплошным, понятие гармоник уже не существует, но можно говорить о плотности мощности сигнала в определенной полосе частот.

В общем виде ППФ записывается следующим образом:

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt,$$

где i на этот раз мнимая единица.

В результате ППФ мы получаем комплексную амплитуду на заданной круговой частоте ω . После тривиальных преобразований можно получить модуль $A(\omega)$ — частотный спектр сигнала $A_i(\omega)$ и фазу $\varphi_i(\omega)$ — фазовый спектр сигнала.

Искажения сигнала при прохождении через искажающее устройство легко учитываются умножением АЧХ сигнала $A_i(\omega)$ на модуль коэффициента передачи искажающей цепи $F(\omega)$ и суммированием фазы $\varphi_i(\omega)$ с фазой искажающего устройства $\varphi_f(\omega)$. Таким образом,

$$A_0(\omega) = A_i(\omega) \cdot F(\omega) \quad \text{и} \quad \varphi_0(\omega) = \varphi_i(\omega) + \varphi_f(\omega).$$

Зная амплитуду и фазу выходного сигнала на заданной частоте, нетрудно найти комплексную амплитуду выходного сигнала $A_f(\omega)$. После этого, используя обратное преобразование Фурье (ОПФ или IFT)

$$y_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A_f(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

можно получить временную зависимость выходного сигнала.

Нетрудно догадаться, что если искажающих устройств несколько, то описанный спектральный метод остается в силе, и достаточно дополнительно учесть амплитудные и фазовые искажения других устройств. При этом коэффициенты передачи устройств перемножаются, а фазовые сдвиги складываются.

Спектральный подход является далеко не единственным. Широкое применение при подобном анализе прохождения сигналов через линейные цепи нашел классический и операторный методы анализа, а при проектировании дискретных (цифровых) устройств — метод z -преобразований. А в главах 5 и 6 читатель найдет детальные сведения о принципиально ином подходе как к синтезу сигналов, так и оценке его искажений — речь идет о вейвлет-преобразовании [71—90]. Там же мы вернемся к обсуждению серьезных недостатков представления сигналов рядами Фурье, которые пока нас особенно не тревожат.

2.1.4. Назначение пакета Signal Processing Toolbox 6.0/6.1

Пакет расширения Signal Processing Toolbox 6.0/6.1 является новой реализацией этого пакета для системы MATLAB 6.5/6.5 SP1/7. Он содержит около 200 функций, реализующих решение ряда задач обработки и фильтрации сигналов с помощью самых современных численных методов, включая упомянутые выше. Вот только некоторые из задач, решаемых с помощью этого пакета:

- задание сигналов различного типа, в том числе модулированных;
- создание окон фильтрации и спектрального анализа;
- реализация прямого и обратного преобразования Фурье (в том числе быстрого БПФ);
- реализация дискретного косинусного и других преобразований сигналов;
- оценка спектральной плотности мощности (СПМ) сложных сигналов;
- статистическая обработка сигналов;
- анализ линейных систем и цепей;
- фильтрация сигналов (в том числе цифровая);
- моделирование работы различных фильтров и вычисление их характеристик и др.

Описание пакета расширения Signal Processing Toolbox 6.0/6.1 дано в трех главах. В данной (второй) главе дается описание средств пакета для моделирования и обработки сигналов. В третьей главе описаны средства фильтрации и анализа систем обработки сигналов, реализуемые из командного режима работы. Наконец, четвертая глава посвящена описанию визуально-ориентированных средств для просмотра и проектирования сигналов и фильтров на основе GUI данного пакета.

2.1.5. Общепринятые сокращения и условные обозначения

В книге использован ряд *общепринятых сокращений*:

АМ — амплитудная модуляция;

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика;

АФП — аналоговый фильтр — прототип;
БИХ — импульсная характеристика бесконечной длины;
БПФ — быстрое преобразование Фурье;
ГВЗ — групповое время задержки;
ДКП — дискретное косинусное преобразование;
ДПФ — дискретное преобразование Фурье;
КАМ — квадратурная амплитудная модуляция;
КИХ — импульсная характеристика конечной длины;
КМК — квадрат модуля функции когерентности;
ОПФ — обратное преобразование Фурье;
ППФ — прямое преобразование Фурье;
СКО — среднеквадратическая ошибка;
СПМ — спектральная плотность мощности;
ФВЧ — фильтр высших частот;
ФИМ — фазоимпульсная модуляция;
ФМ — фазовая модуляция;
ФНЧ — фильтр нижних частот;
ФЧХ — фазо-частотная характеристика;
ЧМ — частотная модуляция;
ШИМ — широтно-импульсная модуляция.

Синтаксис записи функций, принятый в данной книге поясним примером:

```
y = pulstran(t,d, 'func' [,p1,p2,...])
```

Здесь `pulstran` — имя конкретной функции, в круглых скобках дается список параметров, в том числе и вариантов. Варианты, например `func`, заключаются в кавычки и заменяются их значениями. В квадратных скобках в правой части записи функции указываются необязательные параметры — в нашем примере `[,p1,p2,...]`. Такие параметры могут вводиться по мере необходимости. Если нужно ввести параметр со значением по умолчанию вместо его значения применяется пустой список — `[]`. Однако, квадратные скобки в левой части записи функций, например:

```
[Pxx,w] = pburg(x,p)
```

означают, что функция имеет не один, а ряд выходных параметров (выходных аргументов в терминологии MATLAB), указанных в квадратных скобках. Многие функции при опущенных выходных параметрах становятся графическими командами, и их применение приводит к построению тех или иных графических зависимостей.

2.2. Начало работы с пакетом *Signal Processing Toolbox*

2.2.1. Установка пакета *Signal Processing Toolbox*

Пакет устанавливается совместно с системой MATLAB 6.5 SP1 или MATLAB 7. При инсталляции последней просто надо отметить птичкой параметр установки этого пакета (см. главу 1 и рис. 1.2). С помощью коман-

ды `ver` в командной строке MATLAB можно получить список установленных пакетов расширения и узнать их текущие версии.

Все около двух сотен новых функций пакета Signal Processing Toolbox оформлены в виде `m`-файлов и готовы к немедленному применению, наряду со встроенными функциями системы MATLAB. Никакой настройки системы для этого не требуется. Правила применения новых функций те же, что и у встроенных функций системы MATLAB (см. главу 1).

2.2.2. Справка по пакету Signal Processing Toolbox

Пакет Signal Processing Toolbox 6.0/6.1 является мощным расширением системы MATLAB и имеет обширные информационные ресурсы. Они представлены документацией в формате PDF, справочной системой в формате HTML и демонстрационными примерами. Для доступа к этим ресурсам достаточно исполнить команду MATLAB Help а позиции Help меню системы MATLAB 6.5 SP1. Появится окно справки системы MATLAB, показанное на рис. 2.1 (см. выше).

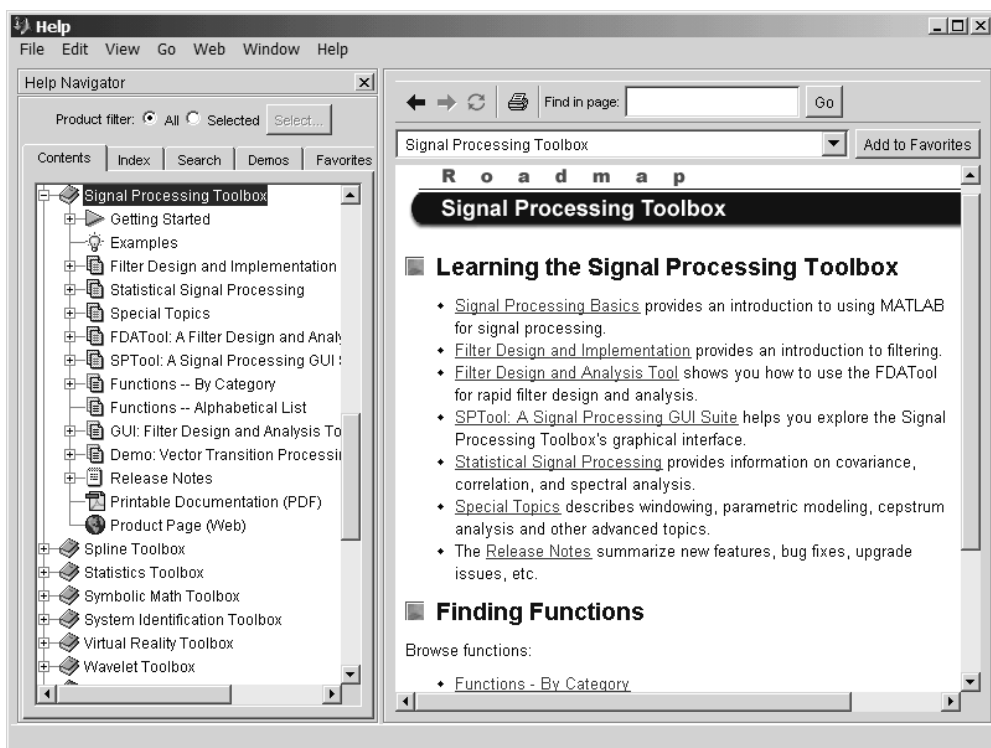


Рис. 2.1. Справка системы MATLAB по пакету расширения Signal Processing Toolbox в формате HTML

В левой части окна справки открыта вкладка Context окна навигатора по справочной системе. Она дает доступ к контекстному разделу справочной системы, представленному в виде дерева разделов системы MATLAB и перечня пакетов расширения этой системы. На рис. 2.1 открыта ветвь этого дерева, соответствующая пакету Signal Processing Toolbox. Можно рассмотреть разделы справки. На рис. 2.2 показан раздел справки по функциям пакета Signal Processing Toolbox,

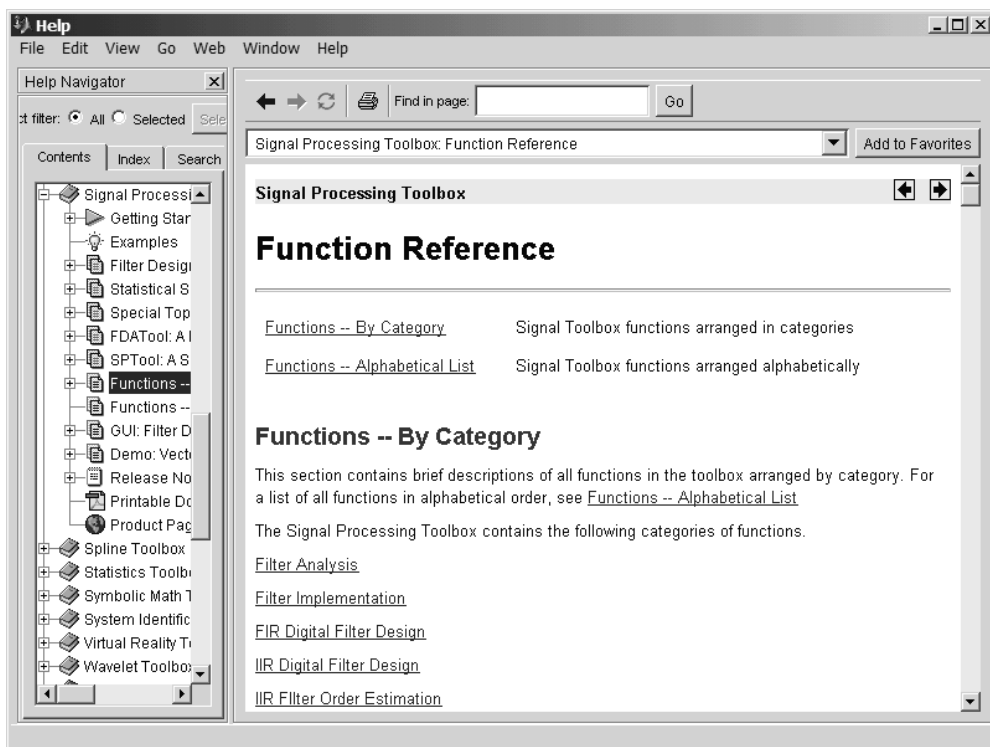


Рис. 2.2. Справка по функциям пакета расширения Signal Processing Toolbox, разбитым на категории

разделенным на категории. Активизируя гиперссылку той или иной функции, можно получить доступ к справке по ней.

Содержание раздела справки, выделенного на вкладке слева видно в окне просмотра, находящемся справа. В нашем случае видно начало справки, посвященной описываемому пакету.

2.2.3. Документация по пакету в формате PDF

Техническая документация на пакет в формате PDF представлена объемным описанием, содержащим 1036 страницы и размещенным в файле с размером около 9 Мбайта. Доступ к этому описанию обеспечивает гиперссылка Signal Processing Toolbox User's Guide, которую можно найти внизу окна просмотра справки на рис. 2.1. Рис. 2.3 показывает титульную страницу этого описания и тематический каталог описания при его просмотре с помощью средства Acrobat Reader (версия 5.0/6.0).

Заметим, что программа Acrobat Reader непосредственно в систему MATLAB не входит, и для просмотра материалов в PDF-формате должна быть установлена на компьютере пользователя (www.adobe.com).

В обновленной реализации пакета Signal Processing Toolbox объем документации заметно вырос и превысил 1000 страниц. Она, естественно, дана на английском языке. Иногда MathWorks поставляет упрощенное описание меньшего размера — без справочника по функциям, имеющегося в справке.

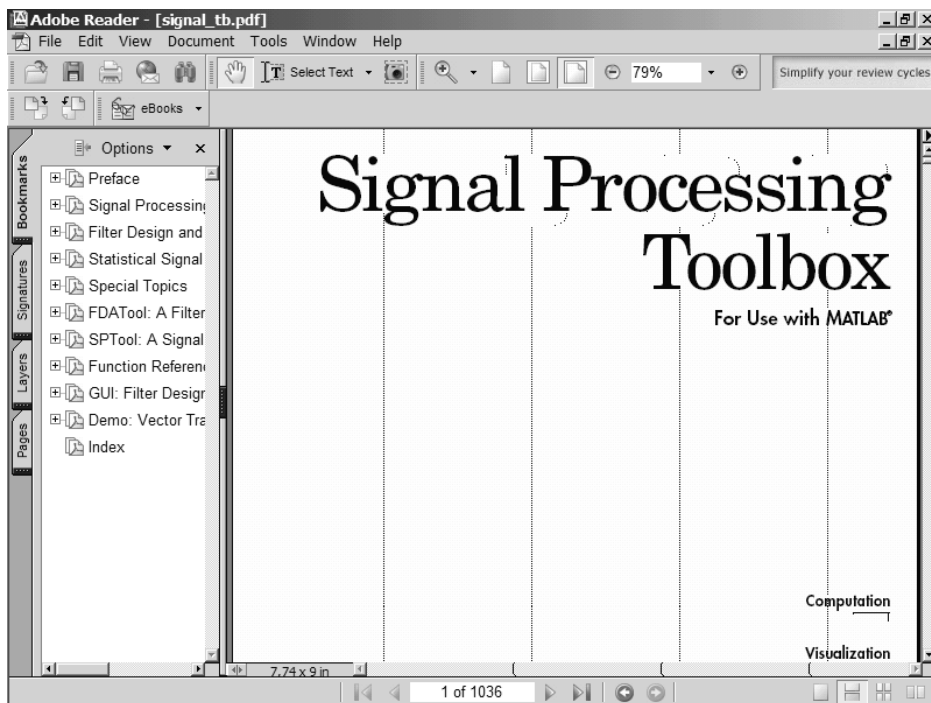


Рис. 2.3. Титульная страница описания пакета Signal Processing Toolbox в формате PDF

2.2.4. Обзор функций пакета

Для *обзора функций* пакета можно использовать тематический каталог справки и документацию в PDF-формате. Однако проще всего это сделать, исполнив в командной строке MATLAB команду:

```
>> help signal
```

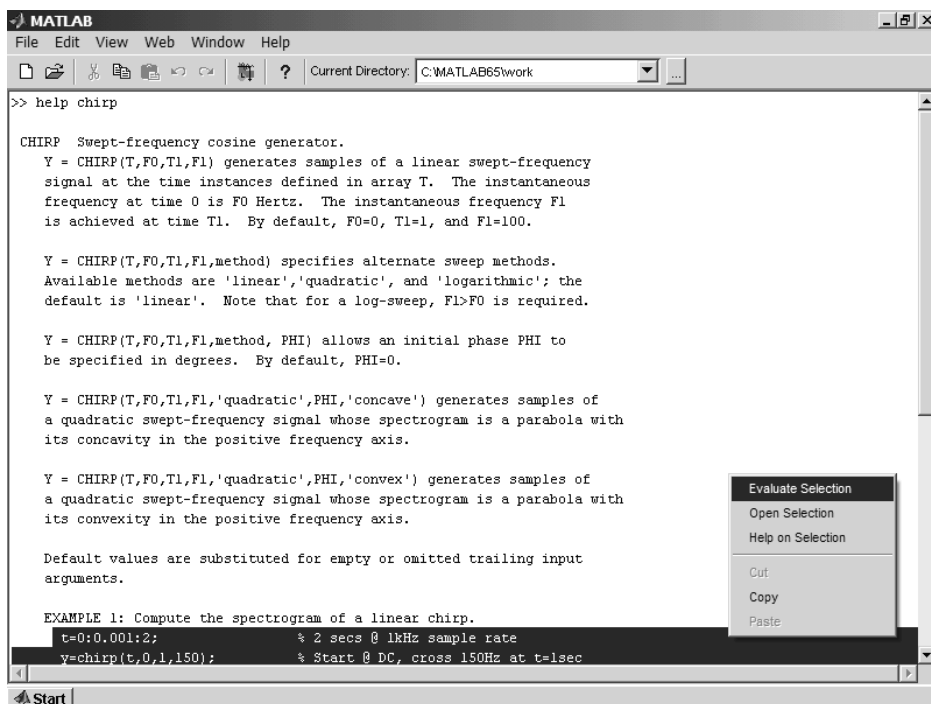
В результате появится список всех функций пакета, объединенных в группы по тематическому признаку. Ввиду большого размера этого списка он не приводится, но читателю рекомендуется просмотреть данный список. Все входящие в этот список функции описаны ниже.

С помощью команды `help name_function` можно также получить справку по любой функции, указав ее имя вместо `name_function`. Пример этого для функции `chirp` (генерация косинусоидального сигнала с меняющейся частотой) представлен на рис. 2.4. Полезно обратить внимание на то, что после описания функции дается ряд примеров на ее применение.

Естественно, что справки, вызываемые из командной строки, и вся обширная фирменная документация представлены на английском языке.

2.2.5. Просмотр демонстрационных примеров из справки

С общими возможностями пакета расширения Signal Processing Toolbox можно познакомиться с помощью *демонстрационных примеров*. MATLAB предоставляет для этого обширные и разнообразные возможности. Так, многие функции в своей справке имеют демонстрационные примеры — на рис. 2.4 видно начало первого примера, а всего по этой функции дано 4 примера.

Рис. 2.4. Вывод справки по функции `chirp`

Любой фрагмент справки можно выделить с помощью мыши, поместив курсор в начало фрагмента и перемещая мышь при нажатой левой клавише. Так, на рис. 2.4 показан пример выделения первого примера (без его заглавной текстовой надписи). Теперь, отжав левую клавишу и нажав правую клавишу мыши, можно наблюдать появление контекстно-зависимого меню. Оно также показано на рис. 2.4. в правом нижнем углу. Это меню имеет ряд команд, которые доступны в данной ситуации — для выделенного фрагмента справки.

Поскольку действия с контекстно-зависимым меню правой клавиши мыши достаточно известны, мы не будем обсуждать их в деталях. Отметим лишь две важные возможности: копирования выделенного фрагмента в буфер (команда `Copy`) и перенос его в командную строку с немедленным исполнением (команда `Evaluate Selection`). Последняя открывает возможность ознакомления с результатами выполнения выделенных контрольных примеров из текущей Windows-справки по той или иной функции. Рис. 2.5 показывает результат выполнения первых двух примеров.

Обратите внимание на то, что первый пример оказался невыполненным из-за ошибки в строке 47 его `m`-файла. В такой сложной системе, как MATLAB эта ситуация не должна слишком удивлять пользователя — как говорится «и на солнце есть пятна». А вот второй пример оказался благополучно выполненным.

В данном примере использована функция `specgram` пакета *Signal Processing Toolbox*, позволяющая строить спектрограмму колебания, т. е. графическое представление мгновенного спектра сигнала во времени. Спектрограмма дает представление о распределении частотных компонент сложного колебания (а косиноида с меняющейся частотой к таковым и относится) в каждый момент времени. При этом амплитуда каждой частотной составляющей спектра задает окраску точек спектрограммы.

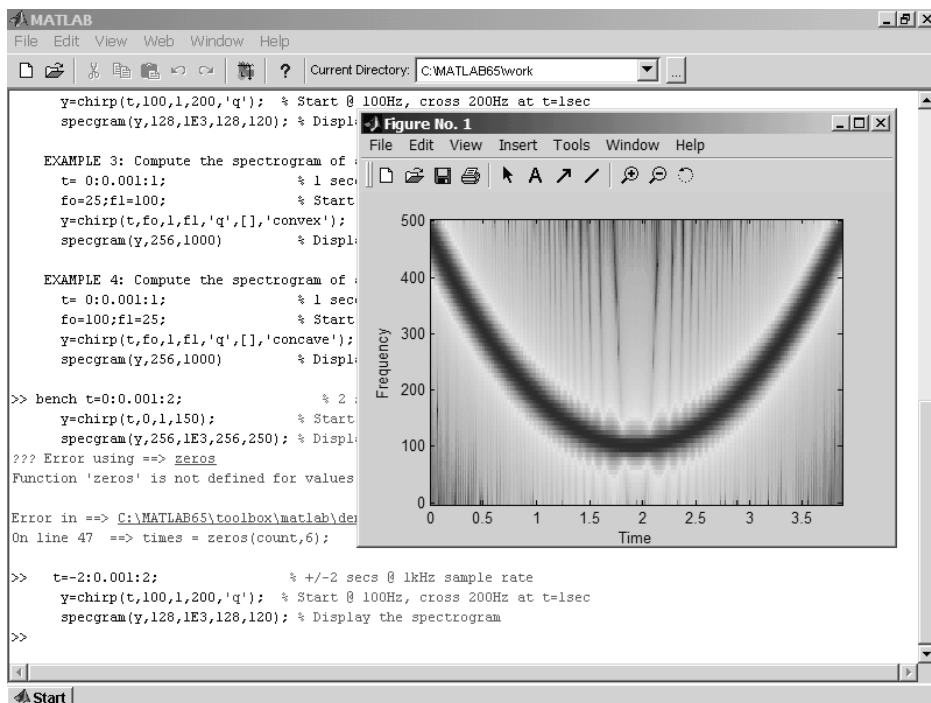


Рис. 2.5. Выполнение примеров из справки по функции `chirp`

С помощью такого подхода (оконное преобразование Фурье) можно четко отследить за законом изменения частотного спектра во времени. Например, в случае спектрограммы, представленной на рис. 2.5, отчетливо видно, что частота колебания линейно меняется во времени по параболическому закону. Это, кстати, трудно установить, наблюдая просто форму временной зависимости колебания — при просмотре осциллограммы колебания можно, разумеется, понять, что частота нарастает или уменьшается во времени, но по какому именно закону — неясно.

***Примечание.** В нашей литературе под спектрограммой часто подразумевают зависимость амплитуды гармоник некоторого сигнала, представленной вертикальными отрезками прямых, от частоты. Однако, в рамках принятой в данной книге терминологии, эту зависимость мы будем называть просто спектром сигналов.*

Как отмечалось, при построении спектрограмм интенсивность частотных составляющих представляется цветом. К сожалению, черно-белые рисунки в книге не позволяют воспроизвести оттенки цвета, и они заменяются оттенками серого цвета (grayscale). Тем не менее, и в этом случае спектрограмма позволяет нередко выявлять особенности сигналов, даже сильно замаскированные шумами.

2.2.6. Выполнение демонстрационных примеров

Для общего знакомства с возможностями системы MATLAB и пакетами ее расширения удобен набор комплексных демонстрационных примеров, размещенных в специальном окне MATLAB Demos. Это окно появляется при ис-

полнении команды `demo` из командной строки (проследите только, что бы был указан путь к папке `demos`) или исполнением команды `Demos` из позиции `Help` меню `MATLAB`. Вид окна `MATLAB Demos` с вводной статьей по пакету `Signal Processing Toolbox` представлен на рис. 2.6. Следует отметить, что в версиях `MATLAB 6.1/6.5` вид окна `Demos` существенно изменился — вместо отдельного окна прежних версий системы оно вошло в состав окна справки, став ее разделом.

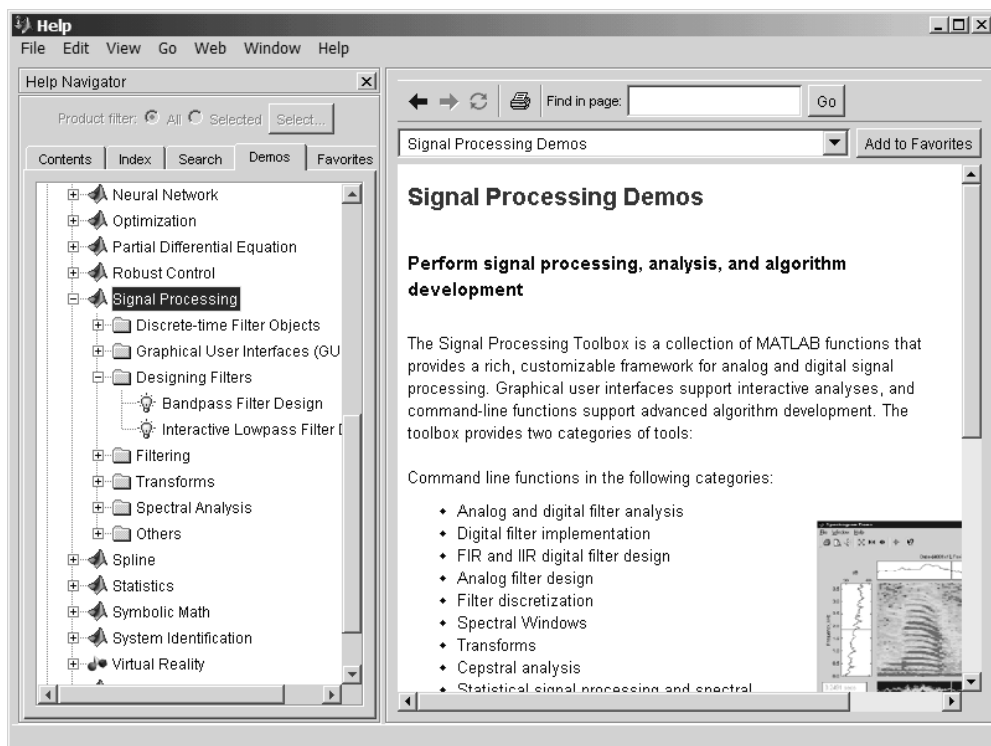


Рис. 2.6. Вид окна `MATLAB Demos` с вводной статьей

В левой части окна имеется перечень демонстрационных примеров, оформленный в виде дерева. В правой части представлены окна аннотации и списка примеров выбранного раздела — рис. 2.7. Этот пример посвящен конструированию полосового фильтра. Для запуска примера достаточно активизировать гиперссылку **Run this demo**. Другая гиперссылка **View code for...** (на месте многоточия имя того или иного примера) обеспечивает просмотр программных кодов примера на языке `MATLAB`.

Большинство из примеров использует специальный графический интерфейс `GUI` и ряд демонстрационных окон — слайдов. На рис. 2.8 заключительный слайд-окно одного из примеров. Здесь показаны вид АЧХ ряда фильтров и программный фрагмент, строящий эти характеристики.

Начиная с версии `MATLAB 6.0`, копирование программных фрагментов из их окна в командную строку не реализовано. И это сделано правильно, поскольку в окнах имеются только фрагменты примеров и их сборка не только трудоемка, но и чревата серьезными ошибками. Как уже отмечалось, команда `View code for ...` по-

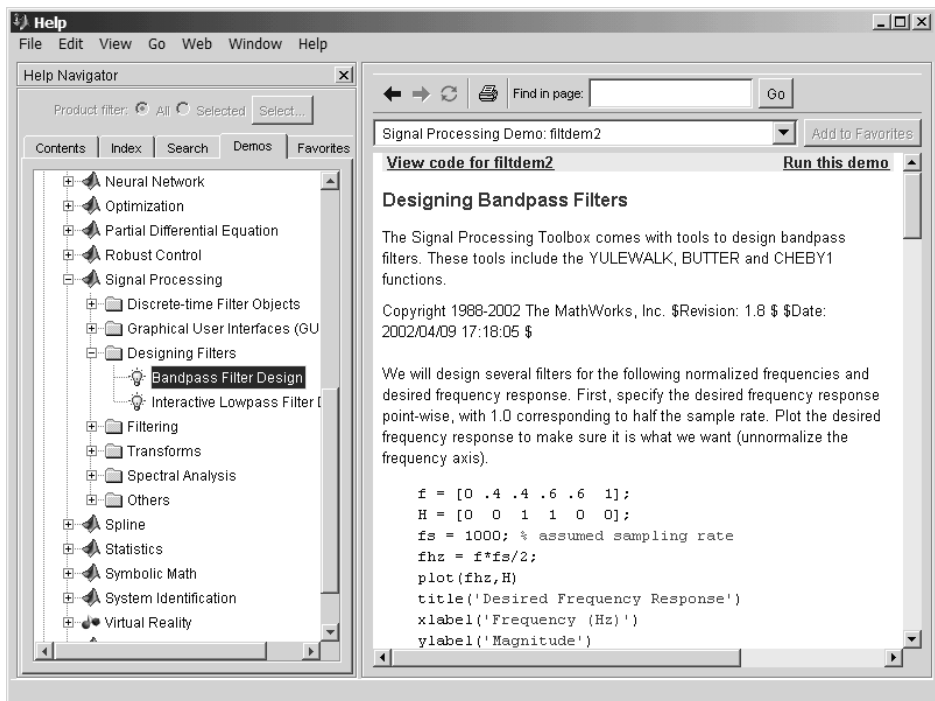


Рис. 2.7. Вид окна MATLAB Demos с описанием одного из примеров

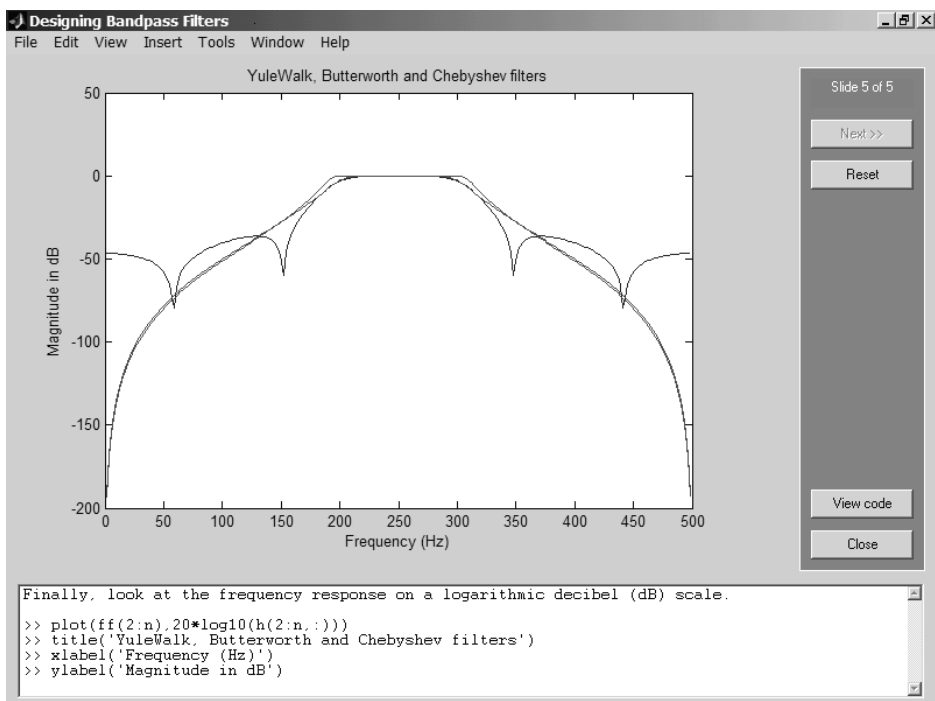


Рис. 2.8. Просмотр одного из примеров

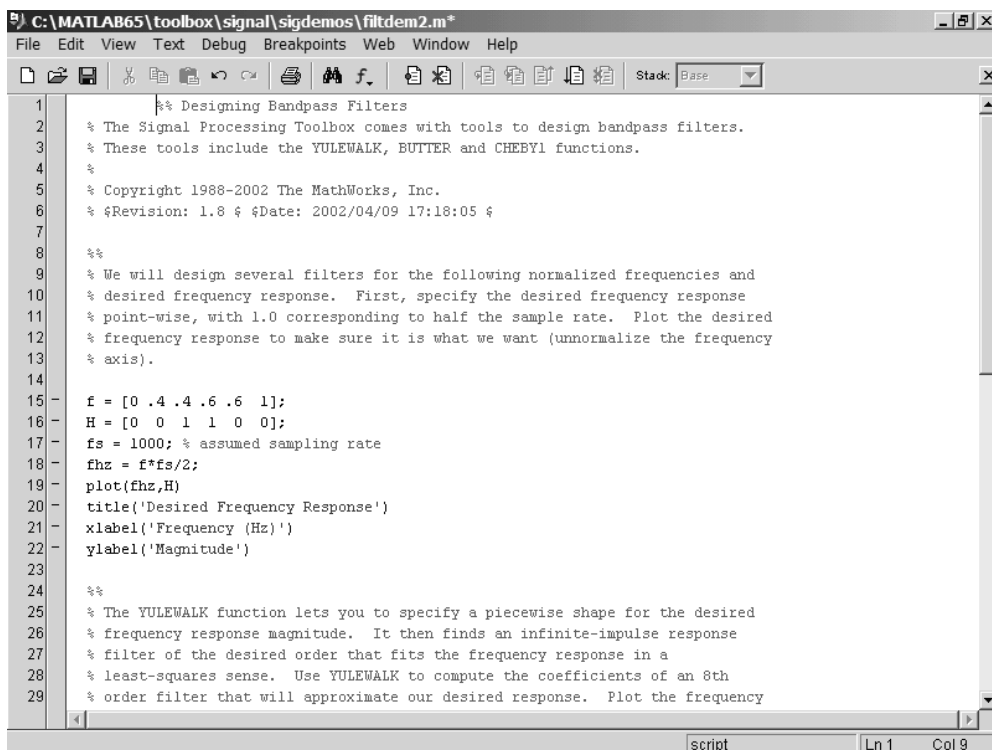


Рис. 2.9. Окно редактора m-файлов с кодами одного из примеров

зволяет вывести окно редактора m-файлов с полным текстом программы для того или иного примера. Для нашего примера это окно представлено на рис. 2.9.

Из сказанного вытекает полная открытость системы MATLAB в отношении применения ее кодов. Можно воспользоваться любыми примерами (а их многие сотни) на уровне их кодов, модифицировать эти коды для решения своих задач. Рекомендуется, однако, сохранять исходные файлы системы и использовать только их копии.

2.2.7. Другие возможности вызова демонстрационных примеров

Описанными способами вызова демонстрационных примеров возможности знакомства с ними не кончаются. В ряде разделов файловой системы MATLAB и ее пакетов расширения есть демонстрационные файлы, содержащие множество полезных примеров применения этой системы. Ограничимся еще одним примером из файла `filtdemo` (см. рис. 2.10).

Этот пример демонстрирует работу низкочастотных фильтров с применением интерфейса GUI пакета Signal Processing Toolbox. Здесь есть возможность выбора типа фильтра из выпадающего списка типов, а также установки различных параметров фильтров. Это дополняется возможностями высококачественной графики, дающей возможность наглядно представлять результаты моделирования и проектирования фильтров.

Содержание

Введение	3
Предупреждения.....	9
Благодарности	10
Адреса для переписки	10
Глава 1. РАБОТА С MATLAB И SIMULINK	11
1.1. Назначение и особенности системы MATLAB	11
1.1.1. Назначение системы MATLAB	11
1.1.2. Версии MATLAB, предшествующие MATLAB 7	12
1.2. Возможности последних реализаций систем MATLAB	12
1.2.1. Возможности версий MATLAB 6.0/6.1	12
1.2.2. Возможности версии MATLAB 6.5	15
1.2.3. Особенности версии MATLAB 6.5 + Service Pack 1.0	16
1.2.4. Особенности версии MATLAB 7 + Simulink 6	17
1.3. Общие особенности матричных систем MATLAB	21
1.3.1. Интеграция с другими программными системами	21
1.3.2. Ориентация на матричные операции	22
1.3.3. Расширяемость системы	23
1.3.4. Мощные средства программирования	24
1.3.5. Визуализация и графические средства	24
1.4. Установка и файловая система MATLAB 7	25
1.4.1. Системные требования	25
1.4.2. Установка системы MATLAB 7 + Simulink 6	26
1.4.3. Файловая система MATLAB	29
1.5. Начало работы с системами MATLAB 7	30
1.5.1. Запуск MATLAB и работа в режиме диалога	30
1.5.2. Понятие о сессии работы с системой MATLAB	31
1.6. Основы интерфейса системы MATLAB 7	32
1.6.1. Новый и старый облик	32
1.6.2. Операции строчного редактирования	34
1.6.3. Команды управления окном	35
1.6.4. MATLAB в режиме прямых вычислений	35
1.6.5. О переносе строки в сессии	38
1.6.6. Запуск примеров из командной строки	38
1.7. Основные объекты MATLAB	39
1.7.1. Понятие о математическом выражении	39
1.7.2. Действительные и комплексные числа	39

1.7.3. Форматы чисел	41
1.7.4. Константы и системные переменные	41
1.7.5. Текстовые комментарии	42
1.7.6. Переменные и присваивание им значений	43
1.7.7. Уничтожение определений переменных	44
1.7.8. Операторы и функции	44
1.7.9. Применение оператора : (двоеточие)	46
1.7.10. Функции пользователя	47
1.7.11. Сообщения об ошибках и их исправление	48
1.8. Формирование векторов и матриц	50
1.8.1. Особенности задания векторов и матриц	50
1.8.2. Объединение малых матриц в большую	52
1.8.3. Удаление столбцов и строк матриц	53
1.9. Операции с рабочей областью, текстом сессии и редактором m-файлов	54
1.9.1. Дефрагментация рабочей области	54
1.9.2. Сохранение рабочей области сессии	54
1.9.3. Ведение дневника	55
1.9.4. Загрузка рабочей области сессии	56
1.9.5. Работа с редактором m-файлов	56
1.9.6. Завершение вычислений и работы с системой	57
1.10. Двумерная графика	58
1.10.1. Особенности графики системы MATLAB	58
1.10.2. Построение графика функций одной переменной	59
1.10.3. Построение в одном окне графиков нескольких функций	60
1.10.4. Графическая функция fplot	61
1.11. Трехмерная графика	62
1.11.1. Построение трехмерных графиков	62
1.11.2. Вращение графиков мышью	63
1.11.3. Контекстное меню графиков	65
1.12. Основы форматирования графиков	65
1.12.1. Форматирование двумерных графиков	65
1.12.2. Форматирование линий графиков	66
1.12.3. Работа с инструментом Plot Tool	68
1.12.4. Работа с редактором графики MATLAB 7	68
1.12.5. Форматирование линий графиков и маркеров опорных точек	68
1.12.6. Форматирование линий и маркеров для графика нескольких функций	70
1.12.7. Форматирование осей графиков	71
1.12.8. Позиция Tools меню окна графики	72
1.12.9. Нанесение надписей и стрелок прямо на график	72
1.12.10. Применение графической «лупы»	74
1.12.11. Построение легенды и шкалы цветов на графике	74
1.12.12. Работа с камерой 3D-графики	75
1.13. Специальные средства графики	77
1.13.1. Обработка данных в графическом окне	77
1.13.2. Полиномиальная регрессия для табличных данных	77
1.13.3. Оценка погрешности аппроксимации	78

1.13.4. Расширенные возможности окна приближения кривых	80
1.13.5. Сплайновая и эрмитовая интерполяции в графическом окне	82
1.13.6. Графики разного типа в одном окне	83
1.13.7. Низкоуровневая дескрипторная графика	84
1.14. Работа со справочной системой MATLAB	86
1.14.1. Запуск справочной системы Help Desk	86
1.14.2. Справка по функциям и полнотекстовый обзор	87
1.14.3. Работа с демонстрационными примерами	90
1.15. Работа с основным пакетом расширения Simulink	91
1.15.1. Доступ к пакету расширения Simulink	91
1.15.2. Запуск моделей Simulink из среды MATLAB	92
1.15.3. Особенности интерфейса Simulink	93
1.15.4. Поиск и загрузка модели	93
1.15.5. Установка параметров компонентов модели	94
1.15.6. Установка параметров моделирования	94
1.15.7. Запуск процесса моделирования	96
1.15.8. Применение субмоделей	96
Глава 2. СОЗДАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ	98
2.1. Возможности пакета Signal Processing	98
2.1.1. Сигналы и их виды	98
2.1.2. Задание сигналов средствами системы MATLAB	100
2.1.3. Прохождение сигналов через искажающие устройства	101
2.1.4. Назначение пакета Signal Processing Toolbox 6.0/6.1	102
2.1.5. Общепринятые сокращения и условные обозначения	102
2.2. Начало работы с пакетом Signal Processing Toolbox	103
2.2.1. Установка пакета Signal Processing Toolbox	103
2.2.2. Справка по пакету Signal Processing Toolbox	104
2.2.3. Документация по пакету в формате PDF	105
2.2.4. Обзор функций пакета	106
2.2.5. Просмотр демонстрационных примеров из справки	106
2.2.6. Выполнение демонстрационных примеров	108
2.2.7. Другие возможности вызова демонстрационных примеров	111
2.3. Работа с комплексными числами и массивами	112
2.3.1. Вычисление модуля комплексного числа — abs	112
2.3.2. Вычисление фазы комплексного числа — angle	112
2.3.3. Группирование комплексных чисел — cplxpair	113
2.3.4. Преобразование в инверсный битовый порядок — bitrevorder	113
2.3.5. Функция удаления элементов в массиве — downsample	114
2.3.6. Добавление элементов в массив — upsample	114
2.4. Моделирование сигналов	115
2.4.1. Инициализация генератора случайных чисел	115
2.4.2. Еще о создании сигналов средствами MATLAB	116
2.4.3. Косинусоида с переменной частотой — chirp	118
2.4.4. Функция Дирихле — diric	119
2.4.5. Синусоида, модулированная функцией Гаусса — gausspuls	120
2.4.6. Генерация Гауссова моноимпульса — gmonopuls	121

2.4.7. Генерация импульсов — pulstran	122
2.4.8. Генерация пилообразного или треугольного колебания — sawtooth	123
2.4.9. Функция sinc и интерполяция сигнала	124
2.4.10. Генерация прямоугольных импульсов — square	125
2.4.11. Генерация аperiodических треугольных импульсов — tripuls	126
2.4.12. Управляемый напряжением источник — vco	127
2.5. Функции задания окон	128
2.5.1. Назначение окон	128
2.5.2. Задание окна Бартлетта — bartlett	129
2.5.3. Задание окна Блэкмана — blackman	130
2.5.4. Задание прямоугольного окна — boxcar	130
2.5.5. Задание окна Чебышева — chebwin	130
2.5.6. Задание окна Хэмминга — hamming	131
2.5.7. Задание окна Хэннинга — hanning	131
2.5.8. Задание окна Кайзера — kaizer	132
2.5.9. Создание треугольного окна — triang	132
2.6. Новые функции задания окон	133
2.6.1. Обобщенная функция задания окон — window	134
2.6.2. Построение графиков амплитудного спектра окон	134
2.6.3. Применение вьюера окон VWTool	135
2.7. Изменение частоты дискретизации сигналов	135
2.7.1. Децимация — decimate	135
2.7.2. Интерполяция сигналов — interp	138
2.7.3. Рациональное изменение частоты дискретизации — resample	139
2.8. Модуляция и демодуляция сигналов	141
2.8.1. Создание модулированных сигналов — modulate	141
2.8.2. Демодуляция сигналов — demod	142
2.8.3. Пофрагментный вывод сигналов — strips	142
2.9. Специальные операции с сигналами	143
2.9.1. Создание буфера кадров сигнала — buffer	143
2.9.2. Свертка одномерных сигналов — conv	144
2.9.3. Операция, обратная свертке — deconv	145
2.9.4. Свертка двумерная и многомерная — conv2 и convn	145
2.9.5. Дискретные сфероидальные последовательности — dpss	145
2.10. Дискретные быстрые преобразования Фурье	146
2.10.1. Прямое одномерное дискретное БПФ — fft	146
2.10.2. Перегруппировка выходного массива преобразования Фурье — fftshift	148
2.10.3. Обратное одномерное дискретное БПФ — ifft	149
2.10.4. Матрица дискретного преобразования Фурье — dftmtx	149
2.10.5. Прямое и обратное двумерное БПФ — fft2 и ifft2	150
2.11. Специальные виды преобразования сигналов	150
2.11.1. Прямое дискретное косинусное преобразование — dct	150
2.11.2. Обратное дискретное косинусное преобразование — idct	151
2.11.3. Z-преобразование по спиральному контуру — czt	152
2.11.4. Преобразование Гильберта — hilbert	152

2.12. Кепстральный анализ	154
2.12.1. Комплексный кепстр действительной последовательности — <code>scsps</code>	154
2.12.2. Вещественный кепстр и минимально-фазовая реконструкция — <code>scsps</code>	155
2.12.3. Обратный комплексный кепстр — <code>icsps</code>	155
2.13. Спектральный анализ дискретных сигналов	155
2.13.1. Основы спектрального анализа дискретных сигналов	155
2.13.2. Параметры функций спектрального анализа	157
2.13.3. Метод Бурга — <code>pburg</code>	157
2.13.4. Ковариационный метод — <code>pcov</code>	160
2.13.5. Модифицированный ковариационный метод — <code>pmcov</code>	160
2.13.6. Многооконый метод — <code>pmtm</code>	160
2.13.7. Метод Уэлча — <code>pwelch</code>	162
2.13.8. Метод собственных значений — <code>peig</code>	162
2.13.9. Метод Юла—Уокера — <code>pyulear</code>	163
2.13.10. Метод классификации множественных сигналов — <code>pmusic</code>	163
2.13.11. Вычисление частот и мощностей по алгоритму MUSIC — <code>rootmusic</code>	165
2.13.12. Сравнение спектральных оценок разными методами	165
2.14. Статистика сигналов	168
2.14.1. Оценка КМК двух сигналов — <code>cohere</code>	168
2.14.2. Взаимная СПМ двух сигналов — <code>csd</code>	169
2.14.3. Вычисление корреляционной и ковариационной матриц — <code>corrcoef</code> и <code>cov</code>	171
2.14.4. Взаимная корреляционная функция — <code>xcorr</code> и <code>xcorr2</code>	171
2.14.5. Оценка матрицы автокорреляции — <code>corrmtx</code>	173
2.14.6. Взаимная ковариационная функция — <code>xcov</code>	173
2.15. Средства визуализации спектра сигналов	173
2.15.1. Построение периодограмм — <code>periodogram</code>	173
2.15.2. Построение графиков спектральной плотности	174
2.15.3. Построение спектрограмм — <code>spectrogram</code>	175
2.15.4. Применение функции дискретного Фурье-преобразования — <code>goertzel</code>	178

Глава 3. ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ180

3.1. Построение характеристик фильтров	180
3.1.1. Классификация фильтров	180
3.1.2. Основные структуры фильтров	182
3.1.3. АЧХ аналогового фильтра — <code>freqs</code>	183
3.1.4. Формирование отсчетов частоты — <code>freqspace</code>	184
3.1.5. АЧХ цифрового фильтра — <code>freqz</code>	185
3.1.6. Коррекция фазового сдвига — <code>unwrap</code>	187
3.1.7. Групповое время задержки — <code>grpdelay</code>	187
3.1.8. Импульсная характеристика цифрового фильтра — <code>impz</code>	189
3.1.9. Построение частотных зависимостей — <code>freqzplot</code>	189
3.1.10. Построение нулей и полюсов — <code>zplane</code>	190
3.1.11. Вычисление второй нормы фильтра — <code>filternorm</code>	191

3.2. Базовые функции фильтрации	192
3.2.1. Дискретная одномерная фильтрация — filter	192
3.2.2. Дискретная двумерная фильтрация — filter2	193
3.2.3. Цифровая фильтрация без фазовых искажений — filtfilt	193
3.2.4. Цифровая фильтрация решетчатым фильтром — latcfilt	194
3.2.5. Одномерная медианная фильтрация — medfilt1	194
3.2.6. Фильтрация фильтром Савицкого—Голея — sgolayfilt	194
3.2.7. Фильтрация каскадным фильтром — sosfilt	195
3.3. Преобразование описаний линейных систем	195
3.3.1. Вычисление коэффициентов передаточной функции по коэффициентам решетчатого фильтра — latc2tf	196
3.3.2. Масштабирование корней полинома — polyscale	196
3.3.3. Стабилизация полинома — polystab	196
3.3.4. Разложение на простые дроби — residuez	197
3.3.5. Функции представления линейных систем в пространстве состояний	198
3.4. Функции линейного предсказания	199
3.4.1. Прямые функции предсказания	199
3.4.2. Обратные функции предсказания	200
3.5. Параметрическое моделирование	200
3.5.1. Расчет параметров линейной АР-модели методом Бурга — arburg	200
3.5.2. Другие функции расчета параметров АР-модели	201
3.6. Аналоговые НЧ-фильтры — прототипы (АФП)	201
3.6.1. Расчет параметров АФП Бесселя — besslap	201
3.6.2. Расчет параметров АФП Баттерворта — buttap	203
3.6.3. Расчет параметров АФП Чебышева I рода — cheblap	204
3.6.4. Расчет параметров АФП Чебышева II рода — cheb2ap	204
3.6.5. Расчет параметров эллиптического АФП — ellipap	205
3.7. Проектирование базовых аналоговых и цифровых фильтров	205
3.7.1. Проектирование аналоговых фильтров Бесселя — besself	205
3.7.2. Проектирование фильтров Баттерворта — butter	207
3.7.3. Проектирование фильтров Чебышева I — cheby1	208
3.7.4. Проектирование фильтров Чебышева II — cheby2	209
3.7.5. Проектирование эллиптических фильтров — ellip	210
3.7.6. Расчет аналоговых фильтров по характеристикам прототипа — lp2*	212
3.7.7. Проектирование цифровых фильтров с БИХ	212
3.7.8. Выбор минимального порядка фильтров с БИХ	214
3.8. Дискретизация аналоговых фильтров	217
3.8.1. Билинейное преобразование — bilinear	217
3.8.2. Инвариантное импульсное преобразование — impinvar	220
3.9. Средства проектирования фильтров с конечной импульсной характеристикой	220
3.9.1. Вычисление матрицы свертки — convmtx	220
3.9.2. Метод Ремеза для фильтров с равными пульсациями — cremez	221
3.9.3. Метод взвешивания — fir1	224
3.9.4. Метод взвешивания для фильтра с произвольной АЧХ — fir2	224

3.9.5. Метод наименьших квадратов — fircls, fircls1 и firls	226
3.9.6. Расчет косинусного фильтра — firrcos	229
3.9.7. Расчет интерполирующего фильтра — intfilt	230
3.9.8. Использование окна Кайзера — kaiserord	232
3.9.9. Проектирование фильтров Ремеза — remez и remezord	234

Глава 4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ236

4.1. Графический интерфейс пакета Signal Processing	236
4.1.1. Назначение графического интерфейса пользователя GUI	236
4.1.2. Демонстрация модуляции/демодуляции — moddemo	236
4.1.3. Вьюверы окон — wintool и wvtool	239
4.1.4. Доступ к инструменту sptools	240
4.1.5. Браузер сигналов	242
4.1.6. Браузер спектра	245
4.2. Демонстрационные примеры на основе GUI	247
4.2.1. Доступ к демонстрационным примерам и средствам проектирования	247
4.2.2. Демонстрация z-преобразований — dztdemo	247
4.2.3. Демонстрация непрерывного и дискретного преобразований Фурье	247
4.2.4. Демонстрация методов спектрального оценивания	249
4.2.5. Пример проектирования полосового фильтра	251
4.2.6. Интерактивное проектирование ФНЧ	252
4.2.7. Демонстрация работы фильтра Савицкого—Голея	252
4.2.8. Демонстрация изменений АЧХ секционных фильтров второго порядка	254
4.3. Визуально-ориентированное проектирование фильтров	254
4.3.1. Проектировщик/анализатор фильтров — fdatoool	254
4.3.2. Панели инструментов — fdtool	256
4.3.3. Браузер фильтров	260
4.3.4. Проектировщик фильтров — Filter Designer	260
4.4. Пакет Digital Signal Processing (DSP) Blockset	263
4.4.1. Разделы библиотеки пакета DSP	263
4.4.2. Работа с источниками и получателями сигналов	264
4.4.3. Работа с блоками математических операций	266
4.4.4. Типовые матричные операции	266
4.4.5. Операции с полиномами	268
4.4.6. Квантование сигналов	268
4.4.7. Управление сигналами	270
4.4.8. Организация очереди и стека	272
4.4.9. Организация сдвигового регистра и линии задержки	274
4.4.10. Подраздел DSP Signal Attributes	274
4.4.11. Переключатели и счетчики	275
4.4.12. Обработка сигналов (раздел Signal Operations)	278
4.4.13. Раздел оценки блоков — DSP Estimation	279
4.4.14. Преобразования сигналов — раздел Transforms	280
4.4.15. Статистическая обработка данных — раздел DSP Statistics	282
4.4.16. Фильтрация сигналов (раздел Filtering)	284

4.5. Примеры моделирования систем на основе пакета DSP	284
4.5.1. Доступ к примерам применения пакета DSP	284
4.5.2. Адаптивная дельта-импульсная кодовая модуляция	284
4.5.3. Дельта-модуляция типа CVSD	285
4.5.4. Сравнение трех видов дельта-модуляции	285
4.5.5. Однополосная модуляция (SSB)	288
4.5.6. FIR-интерполяция синусоидального сигнала	289
4.5.7. Моделирование адаптивного фильтра	290
4.5.8. Моделирование многополосных фильтров	290
4.5.9. Моделирование аудиосистем	291
4.5.10. Быстрый оконной спектральный анализ	293
4.5.11. Моделирование приемника сигналов точного времени	294
4.5.12. Ситуационное моделирование приемника акустических кодов	294
4.6. Взаимодействие пакетов расширения	296
4.6.1. Пакеты расширения со средствами задания и обработки сигналов	296
4.6.2. Работа с пакетом Communication Toolbox	297
4.7. Работа с компьютеризированной виртуальной лаборатории	299
4.7.1. Виртуальные PC-осциллографы фирмы velleman	300
4.7.2. Спектроанализатор на базе виртуального осциллографа фирмы Velleman	302
4.7.3. Самописец на базе виртуального осциллографа фирмы Velleman	303
4.7.4. Работа с PC-осциллографом фирмы velleman	303
4.7.5. Виртуальные функциональные генераторы фирмы velleman	305
4.7.6. Работа с виртуальным функциональным генератором фирмы velleman	306
4.8. Работа с компьютеризированной виртуальной лабораторией PC-Lab 2000	308
4.8.1. Развертывание лаборатории PC-Lab 2000	308
4.8.2. Специальные возможности лаборатории PC-Lab 2000	309
4.9. Обмен данными между лабораторией и системой MATLAB	312
4.9.1. Передача осциллограмм в среду системы MATLAB	312
4.9.2. Взаимодействие MATLAB с функциональным генератором	313
4.9.3. Импорт спектрограмм	314
4.9.4. Об экспорте данных из MATLAB	315

Глава 5. ПАКЕТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ317

5.1. Возможности пакета Filter Design Toolbox	317
5.1.1. Назначение пакета Filter Design Toolbox	317
5.1.2. Справка и документация по пакету Filter Design Toolbox	319
5.1.3. Фильтры и объекты класса Quantized (Q-типа)	319
5.1.4. Влияние погрешности вычислений	320
5.2. Основные функции пакета Filter Design Toolbox	321
5.2.1. Функции преобразования чисел и бинарных строк	321
5.2.2. Функции преобразования ячеек и фильтров	322
5.2.3. Функции конструирования Q-фильтров и оценки их свойств	323
5.2.4. Характеристики Q-фильтров	324
5.2.5. Функции дискретных Q-фильтров	327

5.2.6. Функции тестирования Q-фильтров	328
5.2.7. Функции Q-квантователей и их свойств	329
5.2.8. Функции анализа Q-квантователей	330
5.2.9. Q-БПФ (быстрое преобразование Фурье)	331
5.2.10. Функции конвертирования Q-фильтров	331
5.3. Техника проектирования Q-фильтров	333
5.3.1. Проектирование фильтров в командном режиме работы	333
5.3.2. Использование демонстрационных примеров	334
5.3.3. Адаптивная фильтрация зашумленной синусоиды	335
5.3.4. Адаптивная фильтрация с линейным предсказанием	338
5.3.5. Создание Q-фильтров на основе проектировщика фильтров	342
5.3.6. Создание Simulink-блока спроектированного фильтра	346
5.4. Особенности реализации пакета Filter Design Toolbox 3.0	347
5.4.1. Новые возможности пакета Filter Design Toolbox 3.0	347
5.4.2. Новое представление демонстрационных примеров	347
5.4.3. Доступ к общему перечню демонстрационных примеров	349
5.4.4. Инструменты FDATool и FVT	349
5.5. Пакет расширения Filter Design HDL Coder Toolbox	351
5.5.1. Назначение пакета Filter Design HDL Coder	351
5.5.2. Возможности пакета Filter Design HDL Coder 1.0	352
5.5.3. Доступ к справке пакета Filter Design HDL Coder 1.0	352
5.5.4. Работа с демонстрационными примерами	352
5.5.5. Проектирование фильтров на основе GUI	357

Глава 6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЦЕПЕЙ360

6.1. Пакет расширения RF Toolbox 1.0	360
6.1.1. Назначение пакета расширения RF Toolbox 1.0	360
6.1.2. Системы параметров для объектов RF Toolbox	361
6.1.3. Объекты и методы радиочастотных цепей	362
6.1.4. Работа со справкой пакета RF Toolbox	364
6.1.5. Обзор функций пакета RF Toolbox	367
6.2. Работа с примерами применения пакета RF Toolbox	369
6.2.1. Пример работы с объектами типа RF Circuit	369
6.2.2. Пример работы с объектами типа RF Data	374
6.2.3. Демонстрационные примеры пакета RF Tools	378
6.3. Инструмент RFTool	379
6.3.1. Открытие окна инструмента RFTtool	379
6.3.2. Загрузка примеров в RFTool	380
6.3.3. Визуализация результатов анализа с помощью RFTtool	380
6.4. Пакет расширения RF Blockset	383
6.4.1. Назначение пакета RF Blockset	383
6.4.2. Библиотека блоков пакета RF Blockset	384
6.4.3. Работа с математическими блоками	385
6.4.4. Блоки физических устройств	388
6.4.5. Применение блоков портов ввода/ вывода	389
6.4.6. Визуализация графических характеристик блоков	390

6.5. Примеры применения пакета RF Blockset	392
6.5.1. Сравнение реализаций усилителей	392
6.5.2. Моделирование фильтров на линиях передачи	394
6.5.3. Моделирование многокаскадных радиочастотных систем	396
6.5.4. Примеры совместного применения пакетов RF и Communication Blockset	397

Глава 7. ВЕЙВЛЕТЫ В ПАКЕТЕ WAVELET TOOLBOX400

7.1. Характеристика и место вейвлетов	400
7.1.1. Вейвлеты как новое научное направление	400
7.1.2. Список основных сокращений по вейвлетам	401
7.1.3. Ограничения и недостатки преобразования Фурье	401
7.1.4. Кратковременное (оконное) преобразование Фурье	404
7.1.5. Идея вейвлет-преобразования	405
7.2. Основы теории вейвлет-преобразований	407
7.2.1. Аппроксимирующая и детализирующая компоненты вейвлетов	407
7.2.2. Непрерывное прямое вейвлет-преобразование	409
7.2.3. Вейвлет-анализ сигналов с помощью спектрограмм	410
7.2.4. Вейвлеты в частотной области	411
7.2.5. Непрерывное обратное вейвлет-преобразование	411
7.2.6. Сравнение различных представлений сигналов	412
7.2.7. О скорости вычислений при вейвлет-преобразованиях	413
7.3. Кратномасштабный анализ	413
7.3.1. Ортогональные вейвлеты	413
7.3.2. Дискретное вейвлет-преобразование непрерывных сигналов	414
7.3.3. Суть кратномасштабного анализа	415
7.3.4. Точное и грубое разрешение	417
7.4. Частотный подход и быстрое вейвлет-преобразование	417
7.4.1. Частотный подход к вейвлет-преобразованиям	417
7.4.2. Основы вейвлет-фильтрации	418
7.4.3. Квадратурные фильтры	419
7.4.4. Быстрое вейвлет-преобразование и алгоритм Малла	421
7.4.5. Декомпозиция и реконструкция сигналов в Wavelet Toolbox	422
7.5. Специальные вопросы вейвлет-преобразований	423
7.5.1. Пакетные вейвлеты	423
7.5.2. Дискретный вейвлет-анализ и временные ряды	423
7.5.3. Двумерные вейвлеты	425
7.5.4. Вейвлет-компрессия сигналов и изображений и их очистки от шумов	425
7.6. Краткая характеристика пакета расширения Wavelet Toolbox	426
7.6.1. Назначение пакета Wavelet Toolbox 2.* / 3	426
7.6.2. Техническая документация по пакету Wavelet Toolbox	427
7.6.3. Типы вейвлетов в пакете Wavelet Toolbox	427
7.6.4. Вейвлет-менеджер — wavemngr	428
7.7. Основные функции вейвлет-анализа	431
7.7.1. Центральная вейвлет-частота — centfrq	431

7.7.2. Уменьшение размера матрицы вдвое — dyaddown	432
7.7.3. Увеличение размера матрицы вдвое — dyadup	433
7.7.4. Интегрирование вейвлет-функции — intwave	434
7.7.5. Масштабирование к частоте — scal2frq	435
7.7.6. Аппроксимирующая и масштабирующие функции — wavefunavefun	436
7.7.7. Максимальный уровень вейвлет-разложения — wmaxlev	437
7.8. Семейство вейвлет-фильтров	437
7.8.1. Множество фильтров биортогонального вейвлета — biorfilt	437
7.8.2. Множество фильтров ортогонального вейвлета — orthfilt	439
7.8.3. Фильтры ортогональных или биортогональных вейвлетов — wfilters	440
7.8.4. Биортогональный сплайновый вейвлет-фильтр — biorwavf	440
7.8.5. Комплексный Гауссовский вейвлет — cgauwavf	441
7.8.6. Комплексный вейвлет Морлета — cmorwav	442
7.8.7. Вейвлет-фильтр Коифлета — coifwavf	442
7.8.8. Вейвлет-фильтр Добеши — dbaux и dbwavf	443
7.8.9. Частотный В-сплайновый вейвлет — fbspwavf	443
7.8.10. Гауссовый вейвлет — gauwavf	444
7.8.11. Вейвлет «мексиканская шляпа» — mexihat	445
7.8.12. Вейвлет-функция Мейера — meyer и meyeraux	446
7.8.13. Вейвлет Морлета — morlet	447
7.8.14. Обратный биортогональный вейвлет-фильтр — rbiowavf	448
7.8.15. Вейвлет-фильтр Шеннона	448
7.8.16. Масштабирующие фильтры вейвлета Симлета — symaux и symwavf	448
7.8.17. Сравнение вейвлетов разного типа	449
7.8.18. Грубые (Crude) вейвлеты	449
7.8.19. Бесконечные регулярные вейвлеты	449
7.8.20. Ортогональные вейвлеты с компактным носителем	450
7.8.21. Биортогональные парные вейвлеты с компактным носителем	450
7.8.22. Комплексные вейвлеты	450
7.9. Утилиты управления построением деревьев	451
7.9.1. Обзор утилит управления построением деревьев	451
7.9.2. Построение дерева разложения пакетного вейвлета — drawtree	452
7.9.3. Построение дерева — plot	453
7.9.4. Построение цветной вейвлет-спектрограммы — wpviewcf	453
7.10. Основные утилиты	455
7.10.1. Кодированная версия матрицы — wcodemat	455
7.10.2. Утилита расширения — wextend	455
7.10.3. Извлечение — wkeep	456
7.10.4. Разворот вектора — wgev	457
7.11. Прочие функции	457
7.11.1. Обратное нестандартное БПФ — instdfft	457
7.11.2. Нестандартное прямое БПФ — nstdfft	458
7.11.3. Точки оценки — wvarchg	458

Глава 8. ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТОВ	459
8.1. Непрерывное одномерное вейвлет-преобразование	459
8.1.1. Функция одномерного непрерывного вейвлет-преобразования — <code>cwt</code>	459
8.1.2. Вейвлет-спектрограмма синусоиды с малыми разрывами	459
8.1.3. Вейвлет-спектрограмма степенной функции синуса	461
8.1.4. Вейвлет-представление сигнала с разрывами и шумом	462
8.1.5. Вейвлет-анализ реальных звуковых сигналов	463
8.2. Дискретное одномерное вейвлет-преобразование	465
8.2.1. Нахождение вейвлет-коэффициентов одномерного преобразования — <code>appcoef</code>	465
8.2.2. Функция нахождения одномерных детализирующих коэффициентов — <code>detcoef</code>	466
8.2.3. Одноуровневое дискретное одномерное вейвлет-преобразование — <code>dwt</code>	468
8.2.4. Метод расширения вейвлет-преобразования — <code>dwtmode</code>	469
8.2.5. Одноуровневое обратное вейвлет-преобразование — <code>idwt</code>	470
8.2.6. Прямое восстановление из одномерных вейвлет-коэффициентов — <code>upcoef</code>	471
8.2.7. Одноуровневое восстановление одномерного вейвлет-разложения — <code>upwlew</code>	473
8.2.8. Многоуровневое одномерное вейвлет-разложение — <code>wavedec</code>	474
8.2.9. Многоуровневое одномерное вейвлет-восстановление — <code>waverec</code>	474
8.2.10. Восстановление одиночной ветви из одномерных вейвлет-коэффициентов — <code>wgcoef</code>	475
8.3. Средства GUI одномерного вейвлет-преобразования	477
8.3.1. Вызов окна GUI пакета Wavelet Toolbox — <code>wavemenu</code>	477
8.3.2. Просмотр вейвлетов — окно Wavelet Display	477
8.3.3. Доступ к демонстрационным примерам — <code>wavedemo</code>	480
8.3.4. Работа с демонстрационными примерами	482
8.3.5. Просмотр примера Short 1D scenario	485
8.3.6. Демонстрационные примеры GUI	486
8.4. Дискретное двумерное вейвлет-преобразование	488
8.4.1. Нахождение вейвлет-коэффициентов двумерного преобразования — <code>appcoef2</code>	488
8.4.2. Функция нахождения двумерных детализирующих коэффициентов — <code>detcoef2</code>	489
8.4.3. Одноуровневое дискретное двумерное вейвлет-преобразование — <code>dwt2</code>	490
8.4.4. Одноуровневое дискретное двумерное обратное вейвлет-преобразование — <code>idwt2</code>	490
8.4.5. Прямое восстановление из двумерных вейвлет-коэффициентов — <code>upcoef2</code>	491
8.4.6. Многоуровневое двумерное вейвлет-разложение — <code>wavedec2</code>	491
8.4.7. Одноуровневое восстановление двумерного вейвлет-разложения — <code>upwlew2</code>	492
8.4.8. Многоуровневое двумерное вейвлет-восстановление — <code>waverec2</code>	492

8.4.9. Восстановление одиночной ветви из двумерных вейвлет-коэффициентов — <code>wgcoef2</code>	493
8.5. Пакетные вейвлет-алгоритмы	494
8.5.1. Наилучшее дерево уровня — <code>bestlevt</code>	494
8.5.2. Наилучшее дерево по критерию энтропии — <code>besttree</code>	494
8.5.3. Вычисление энтропии — <code>wentropy</code>	496
8.5.4. Обновление энтропии — <code>entrupd</code>	497
8.5.5. Извлечение вейвлет-дерева из пакетного дерева — <code>wp2wtree</code>	498
8.5.6. Пакетные вейвлет-коэффициенты — <code>wpccoef</code>	498
8.5.7. Сечение вейвлет-пакетного дерева — <code>wpcutree</code>	499
8.5.8. Пакетное одномерное вейвлет-разложение — <code>wpdec</code>	500
8.5.9. Пакетное двумерное вейвлет-разложение — <code>wpdec2</code>	501
8.5.10. Пакетная вейвлет-функция — <code>wpfun</code>	501
8.5.11. Перекомпонованный пакетный вейвлет — <code>wprjoin</code>	502
8.5.12. Восстановление коэффициентов пакетного вейвлета — <code>wrgcoef</code>	502
8.5.13. Пакетное вейвлет-восстановление — <code>wrges</code> и <code>wrges2</code>	503
8.6. Дискретное стационарное вейвлет-преобразование	504
8.6.1. Дискретное стационарное одномерное вейвлет-преобразование — <code>swt</code>	504
8.6.2. Обратное одномерное стационарное дискретное вейвлет-преобразование — <code>iswt</code>	504
8.6.3. Дискретное стационарное двумерное вейвлет-преобразование — <code>swt2</code>	505
8.6.4. Обратное стационарное двумерное дискретное вейвлет-преобразование — <code>iswt2</code>	506
8.7. Удаление шумов и сжатие сигналов и изображений	507
8.7.1. Принципы очистки сигналов и шумов	507
8.7.2. Установка параметров по умолчанию — <code>ddencmp</code>	507
8.7.3. Выбор порога для удаления шумов — <code>thselect</code>	508
8.7.4. Штрафной порог для удаления шума — <code>wbmpen</code>	509
8.7.5. Порог одномерного вейвлета — <code>wdcbm</code>	510
8.7.6. Порог двумерного вейвлета — <code>wdcbm2</code>	511
8.7.7. Создание архива отпечатков пальцев	511
8.7.8. Автоматическое одномерное удаление — <code>wden</code>	512
8.7.9. Удаление шума и сжатие — <code>wdencomp</code>	515
8.7.10. Генерация тестовых сигналов — <code>wnoise</code>	516
8.7.11. Оценка шума одномерных вейвлет-коэффициентов — <code>wnoisest</code>	518
8.7.12. Штрафной порог для удаления шумов пакетного вейвлета — <code>wrbmpen</code>	518
8.7.13. Удаление шумов и сжатие с использованием пакетного вейвлета — <code>wpdencmp</code>	519
8.7.14. Пример очистки изображения от шума	520
8.7.15. Порог коэффициентов пакетного вейвлета — <code>wpthcoef</code>	521
8.7.16. Одномерный порог вейвлет-коэффициентов — <code>wthcoef</code>	521
8.7.17. Двумерный порог вейвлет-коэффициентов — <code>wthcoef2</code>	521
8.7.18. Установка гибкого или жесткого порогов — <code>wthresh</code>	522
8.7.19. Управление параметрами порога — <code>wthrmngr</code>	522

8.8. Обзор основных применений вейвлет-технологии	522
8.8.1. Выявление тонких особенностей сигналов с помощью непрерывных вейвлетов	522
8.8.2. Статистическая обработка сигналов и их дискретных вейвлетов	525
8.8.3. Компрессия сигналов	527
8.8.4. Очистка сигнала от шума	529
8.8.5. Очистка сигналов от шумов с помощью стационарных вейвлетов	530
8.8.6. Оценка плотности сигналов	530
8.8.7. Регрессия по результатам оценки плотности сигналов	530
8.8.8. Расширение и экстраполяция сигналов	532
8.8.9. Двумерное вейвлет-разложение и реконструкция изображений	534
8.8.10. Двумерное пакетное вейвлет-разложение и реконструкция изображений	535
8.8.11. Компрессия изображения и очистка его от шума	536
8.8.12. Расширение изображений	538
8.9. Особенности различных версий Wavelet Toolbox	539
8.9.1. Новые возможности пакета Wavelet Toolbox 2.1	539
8.9.2. Новая функция — disp	540
8.9.3. Новая функция — wavefun2	540
8.9.4. Новые функции в Wavelet Toolbox 3.0	541
8.10. Вейвлет-преобразования в пакете DSP	544
8.10.1. Интерполяция с применением вейвлет-преобразований	544
8.10.2. Реконструкция сигнала на основе вейвлет-преобразования	544
8.10.3. Моделирование трехканального wavelet-мультиплексора	546
8.10.4. Очистка сигнала от шумов на основе вейвлет-преобразований	546
8.11. Перспективы дальнейшего развития вейвлет-технологии	547
8.11.1. Вейвлеты в графике	547
8.11.2. Вейвлеты в очистке сигналов от шума	548
8.11.3. Вейвлеты в Интернете	548
8.11.4. Аппаратная реализация вейвлет-преобразований	549
8.11.5. Вейвлеты в решении математических и физических задач	550
8.11.6. Вейвлеты в предсказании событий	550
8.11.7. Заключительные замечания	551

Приложение

Состав различных версий системы MATLAB	552
Состав версии MATLAB 6.0	552
Состав версии MATLAB 6.1	553
Состав версии MATLAB 6.5	554
Состав версии MATLAB 6.5 SP1	556
Состав версии MATLAB 7	557

Список литературы	559
-------------------------	-----