

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В MATLAB РЕАЛЬНЫХ ОСЦИЛЛОГРАММ WAVEFORM MATH AND SPECTRUM ANALYSIS USING MATLAB

Дьяконов В.П. (V. Dyakonov), д.т.н., проф., Смоленский государственный университет

Система компьютерной математики (СКМ) в наше время широко внедряются в измерительную технику [1]. Матричная СКМ MATLAB стала мировым стандартом программного обеспечения для решения, программирования и математического моделирования серьезных научно-технических задач [2-6]. Компании Tektronix, Agilent Technologies и др. предусматривают работу своих приборов с опциями СКМ MATLAB. В этой статье описана техника стыковки современных цифровых осциллографов с системой MATLAB. Описан математический и спектральный анализ с ее помощью реальных осциллограмм рядом методов, пока не доступных в самих приборах.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерительная установка для проведения исследований по применению СКМ MATLAB в осциллографии показана на рис. 1. Для создания тестовых сигналов использован генератор произвольных функций Tektronix AFG3101 [6]. Второй функциональный генератор Metex MXG-9810, подключенный к входу внешнего добавляемого сигнала генератора AFG3101, служит для создания сигналов, добавляемых к основному сигналу AFG3101. Для связи с ПК использовались также программы VISA, Open Choice и ArbExpress Tektronix Edition, поставляемые фирмой Tektronix.



Рис. 1. Измерительная установка

Цифровой осциллограф в принципе может быть любым, имеющим интерфейс USB. Возможно применение массовых осциллографов Tektronix серий 1000/2000/3000 и более старших 4000/5000 и др. В приборах на основе ПК с открытой архитектурой (серии 5000/6000/7000/70000) MATLAB можно установить прямо на их жесткий диск.

Большинство примеров в данной статье дано для 4-канального 1-Гц осциллографа с закрытой архитектурой Tektronix DPO4101. Это лучшая модель данного класса и более дешевая, чем осциллографы с открытой архитектурой.

Длина памяти ее осциллограмм (рис. 2) достигает 10 Мточек/канал, но практически использовалась длина памяти в 1 или 10 Кточек.

ПРОГРАММА ВВОДА В ПК ОСЦИЛЛОГРАММЫ ОДНОГО КАНАЛА

Основой программного обеспечения комплекса является матричная система MATLAB [4]. Она позволяет анализировать данные, представленные в виде векторов и матриц. MATLAB (для определенности, это новейшая версия

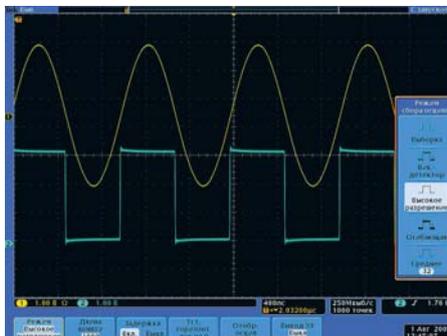


Рис. 2. Осциллограммы сигналов двух каналов осциллографа DPO4101

R2009a) имеет специальный пакет расширения для поддержки инструментальных средств Instrument Control Toolbox. Он поддерживает работу с измерительными приборами фирм Tektronix, Agilent Technologies, Hewlett Packard и др. Кроме того, MATLAB имеет около сотни профессионально-ориентированных пакетов расширения в различных областях науки и техники. Ниже использованы отдельные средства пакетов Signal Processing Toolbox и Wavelet Toolbox. Они расположены в инструментальном ящике Toolbox. В другом ящике Blockset имеются средства, в частности библиотеки блоков, для системы блочного имитационного моде-

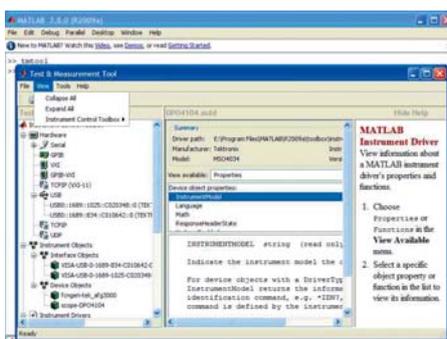


Рис. 3. Применение инструмента Test&Measuring Tool для подготовки приборов фирмы Tektronix для работы с системой MATLAB R2009a

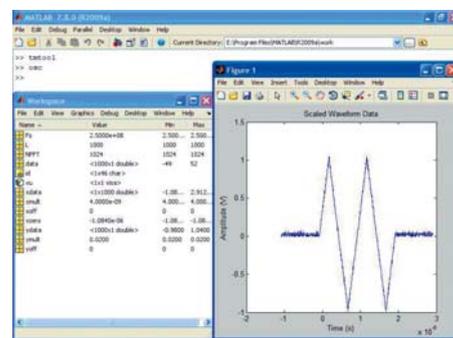


Рис. 4. Пример получения данных в рабочем пространстве MATLAB и построения осциллограммы в графическом окне MATLAB

лирования Simulink, получившей большую популярность.

После подключения приборов к USB-порту и их включения надо обеспечить работу приборов с ПК. Для этого можно использовать команду `tmtool` и вызываемое ею окно (рис. 3). В дереве левой части окна надо последовательно обеспечить выбор USB-устройств, создание интерфейсного (interface) и приборного (device) объектов и установку драйверов. При отсутствии драйверов их можно скачать из Интернета.

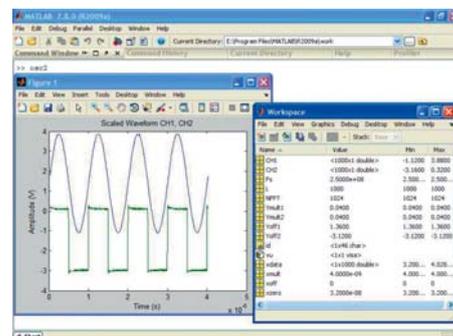


Рис. 5. Графики сигналов и массивы в рабочей области при исполнении программы osc2

Для ввода осциллограмм в MATLAB нужна специальная согласующая программа `osc`, которая переносила бы данные анализируемой осциллограммы из памяти осциллографа в рабочее пространство MATLAB с учетом реального размещения осциллограммы, ее положения (сдвига) по оси времен и по оси уровня сигнала с учетом масштабирующих коэффициентов по времени и по уровню. Подобная программа для одного канала (`osc`) осциллографа Tektronix серии TDS2000B, составленная на языке программирования системы MATLAB, описана в [2, 3]. В варианте этой программы для осциллографа се-

рии DPO4000 достаточно заменить в третьей строке идентификатор осциллографа TDS2000B на соответствующий примененному осциллографу.

Файл программы osc.m размещается в директории WORK системы MATLAB и эта директория должна быть задана в MATLAB как рабочая. В программе надо использовать идентификатор осциллографа (рис. 3). Его можно найти в инструкции по программированию осциллографа или с помощью программы OpenChoice. Программа osc должна запускаться перед каждым циклом измерений. Она определяет длину исходной осциллограммы и создает векторы координат xdata и ydata точек в реальном масштабе осциллограммы с учетом сдвигов и масштабов по осям X (частоты) и Y (напряжения), а также строит график осциллограммы в графическом окне системы MATLAB (рис. 4). Кроме того, программа вычисляет частоту дискретизации осциллограммы Fs и задает

число шагов быстрого преобразования Фурье NFFT по умолчанию.

Реальная осциллограмма на экране осциллографа дважды квантована — АЦП соответствующего канала и системной выводу осциллограмм на экран дисплея с конечным разрешением. Это означает наличие заметных шумов квантования, отсутствующих в сигнале. Поэтому точной копией видимой осциллограммы график программы osc не является — это кадр последней из памяти осциллографа.

ПРОГРАММА ВВОДА В ПК ОСЦИЛЛОГРАММ ДВУХ КАНАЛОВ

Аналогичным образом может быть составлена программа для ввода в рабочее пространство MATLAB осциллограмм с двух и более каналов. Листинг такой программы osc2 для двух каналов (CH1 и CH2) с подробными комментариями представлен во врезке.

В этой программе массивы данных каналов обозначены как CH1 и CH2.

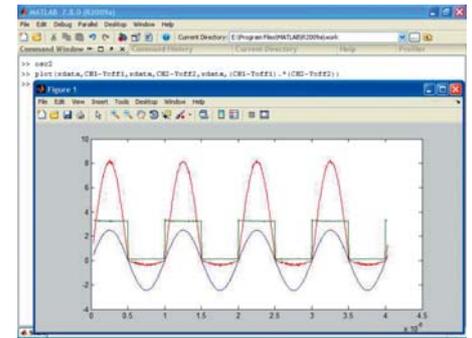


Рис. 6. Построение графиков сигналов каналов CH1 и CH2 с удалением их сдвига по вертикали и произведения полученных сигналов

Программа создает также массивы масштабных множителей Ymult1 и Ymult2, а также массивы сдвигов по вертикали Yoff1 и Yoff2, а также массивы данных горизонтальной оси (оси времени). Программа строит в одном окне MATLAB графики обоих сигнала с реальными масштабами (см. рис. 5 для сигналов рис. 2). По ее подобию можно составить программу для передачи в ПК данных осциллограмм со всех четырех каналов осциллографа.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ С СИГНАЛАМИ ДВУХ КАНАЛОВ

Большинство осциллографов имеет простейшие операции с сигналами каналов, например, операции их сложения и вычитания. MATLAB позволяет выполнять не только такие операции, но и более сложные, причем задаются они гораздо проще, чем при использовании в осциллографе. На рис. 6 показано выполнение трех операций: построение сигналов каналов CH1 и CH2

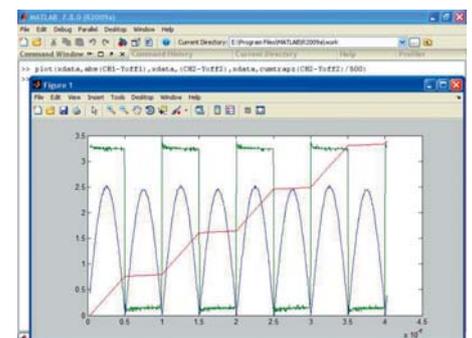


Рис. 7. Построение модуля сигнала первого канала CH1, сигнала второго канала с удаленным смещением и кумулятивного интеграла от этого сигнала

с удалением их сдвига по вертикали, а также операции перемножения этих сигналов.

На рис. 7 показано построение модуля сигнала первого канала CH1, сигнала второго канала с удаленным смещением и кумулятивного интеграла от этого сигнала. Для интегрирования используется MATLAB функция sumtrapz, реализующая численное интегрирование методом трапеций.

(Продолжение следует)

```
%Программа обеспечивает передачу данных с осциллографа DPO4101
%в рабочее пространство (память)системы MATLAB
vu = visa('tek','USB0::1689::1025::C020348::0::INSTR'); %создание VISA-объекта
fopen(vu); %Открытие объекта vu
%Считывание данных с канала CH1 и определение длины записи
id=query(vu,'*IDN?');
fprintf(vu,'DATA:SOURCE CH1');
L=query(vu,'HORIZONTAL:RECORDLENGTH?','%s\n','%d');
fclose(vu); %Закрытие объекта
vu.InputBufferSize = L; %Задание длины входного буфера
%Считывание данных построения осциллограмм
fopen(vu) %Открытие объекта vu
fprintf(vu, 'CURVE?') %Считывание данных построения осциллограмм
CH1=binblockread(vu,'schar');
xmult = str2num(query(vu,'WFMP:XINCR?')); %масштаб по оси X (времени)
xoff = str2num(query(vu,'WFMP:PT_OFF?')); %сдвиг по оси X
xzero = str2num(query(vu,'WFMP:XZERO?')); %ноль на оси X
xdata = xmult*((0:length(CH1)-1)-xoff)+xzero; %реставрация по оси X
Ymult1 = str2num(query(vu,'WFMP:YMULT?')); %масштаб по Y канала CH1
Yoff1 = str2num(query(vu,'WFMP:YOFF?'));%сдвиг по оси Y канала CH1
Yoff1 = Yoff1*Ymult1;
CH1 = Ymult1*CH1; %Реставрация по оси Y
fclose(vu) %закрытие объекта vu
fopen(vu); %Открытие объекта vu
%Считывание данных с канала CH2 и определение длины записи
id=query(vu,'*IDN?');
fprintf(vu,'DATA:SOURCE CH2');
fclose(vu); %Закрытие объекта
fopen(vu) %Открытие объекта vu
%Считывание данных построения осциллограмм
fprintf(vu, 'CURVE?')
CH2=binblockread(vu,'schar');
Ymult2 = str2num(query(vu,'WFMP:YMULT?')); %масштаб по Y канала CH2
Yoff2 = str2num(query(vu,'WFMP:YOFF?')); %сдвиг по оси Y канала CH2
Yoff2 = Yoff2*Ymult2;
%Реконструкция данных для построения графики осциллограммы
CH2 = Ymult2*CH2; %координаты точек по оси Y
fclose(vu) %закрытие объекта vu
%Построение осциллограммы в графическом окне MATLAB
plot(xdata,CH1,xdata,CH2)
title('Scaled Waveform CH1, CH2'); ylabel('Amplitude (V)');
xlabel('Time (s)')
Fs = 1/xmult; %Вычисление частоты отсчетов
FFT = 1024; %Задание числа гармоник FFT
```

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В MATLAB РЕАЛЬНЫХ ОСЦИЛЛОГРАММ

WAVEFORM MATH AND SPECTRUM ANALYSIS USING MATLAB

Дьяконов В.П. (V. Dyakonov), д.т.н., проф., Смоленский государственный университет

(Окончание, начало см. № 1-2010)

Большинство цифровых осциллографов плохо приспособлены для построения графиков параметрически заданных функций (оно соответствует режиму XY, когда в каналы X и Y подаются разные сигналы). Но графика MATLAB легко реализует и эту возможность (см. пример на рис. 8).

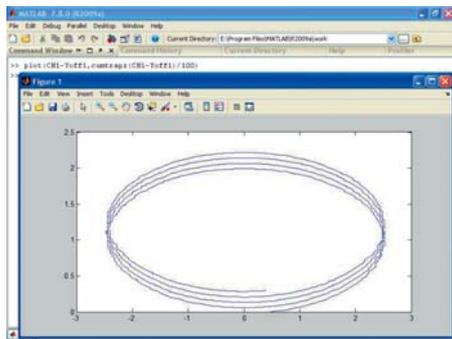


Рис. 8. Пример построения графика параметрически заданной функции

Разумеется, с помощью MATLAB нетрудно выполнить и многие другие математические расчеты и вычисления. Например, легко вычислить минимальные и максимальные значения элементов массивов сигналов, их среднее и среднеквадратичное значения и т.д. Для этого доступны все сотни функций этой системы и ее пакетов расширения. Задание вычислений просто и наглядно выполняется с помощью обычной клавиатуры.

ОЧИСТКА ОСЦИЛЛОГРАММЫ ОТ ШУМА

Одной из важных задач обработки сигналов является их очистка от шума. Применяя пакет приближения функций Curve Fitting Toolbox можно использовать статистические средства очистки сигналов от шума. Для этого в пакете, кроме соответствующей про-

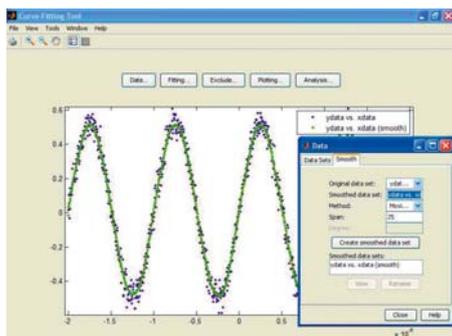


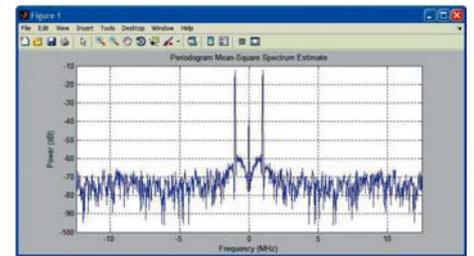
Рис. 9. Пример сглаживания (очистки от шума) зашумленного синусоидального сигнала

граммной функции сглаживания smooth, есть удобный в работе инструмент cftool, окно графического интерфейса пользователя (GUI) которого, для примера очистки от шума зашумленной синусоиды, показано на рис. 9. В окне Data вначале на вкладке Data Set надо указать массивы xdata и ydata, создаваемые программой osc, и создать массив точек ydata. Затем в окне Smooth (Сглаживание) надо задать один из ряда видов сглаживания данных и указать массив сглаженных точек. На рис. 9 дан пример для сглаживания методом скользящего среднего с использованием в окне сглаживания 25 точек. Очевидна довольно высокая степень сглаживания (очистки сигнала от шума). Пользователь может опробовать и другие методы сглаживания.

ФУРЬЕ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПЕРИОДОГРАММЫ

MATLAB значительно расширяет возможности спектрального анализа реальных осциллограмм, реализуя его целым рядом методов. Классическое прямое Фурье-преобразование периодических сигналов (в том числе осциллограмм) в отсчеты амплитуд их гармоник в настоящее время широко известно и реализовано практически во всех цифровых осциллографах и анализаторах спектра [2-4]. Будем называть его результат просто спектром. Идеальный спектр периодических сигналов дает значения амплитуды всех гармоник, которые графически представляются отрезками прямых с высотой, определяемой их амплитудой. Частоты высших гармоник пропорциональны частоте повторения сигнала (первой гармоники). Таким образом, подобный спектр строится в двух измерениях — амплитуды и частоты. Прямой временной информации он не несет. Ее получение требует проведения обратного преобразования Фурье.

Практически в осциллографах используется быстрое преобразование Фурье (БПФ или FFT) для дискретных сигналов. Оно не меняет сути преобразований Фурье, но резко его ускоряет. Простейшее FFT ограничивает длительность сигнала заданным отрезком времени и фактически означает применение прямоугольного окна с шириной, равной длине осциллограммы (далее это 1000 или 10000 точек). Сигнал делается периодическим. Если уровень сигнала в начале и в конце отрезка не одинаков (в окне помещается не целое



число периодов сигнала), то вид спектра сильно искажается — появляется размывание спектра и боковые лепестки его линий. Традиционный способ ослабления этих эффектов — применение окон, вырезающих сигнал так, что его уровень в начале и в конце окна близок к нулю. Но, это ведет к расширению основной линии спектра — из отрезка прямой она превращается в пик с довольно широким основанием и боковыми лепестками. Вид этой кривой задается типом окна.

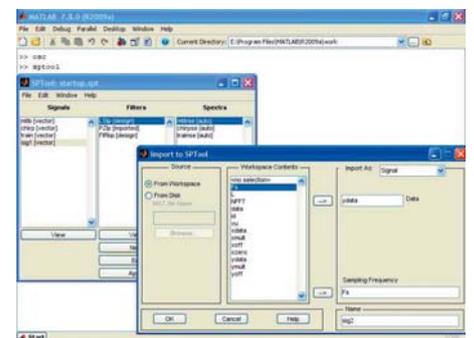


Рис. 11. Окно инструмента SPTool и загрузки ydata и Fs

В MATLAB подобный спектр называется периодограммой и она строится функцией periodogram. Рассмотрим получение периодограммы для непрерывного чистого синусоидального сигнала с частотой 1 МГц и двойной амплитудой 1 В. Следующая простая программа (файл msspeg.m) строит часто применяемый спектр мощности сигнала (выраженной в децибелах мощности):

```
h = spectrum.periodogram('hamming');
hopts = psdopts(h,ydata);
set(hopts,'Fs',Fs,'SpectrumType','two-sided','centered',true);
msspectrum(h,ydata,hopts);
```

Запустив эту программу получим спектр синусоидального сигнала (рис. 10). Спектр соответствует теоретическому — он представлен двумя спектральными пиками — по одному для областей положительных и отрицатель-

ных частот. Вид пика задается окном Хэмминга (Hamming), которое можно заменить другим окном. MATLAB поддерживает до двух десятков типов окон (у цифровых осциллографов их до 5-6). При логарифмическом масштабе спектра по вертикали удается получить широкий динамический диапазон, но это неизбежно ведет к появлению внизу спектра отчетливо видимой шумовой дорожки. Она наблюдается даже если исходный сигнал чистый.

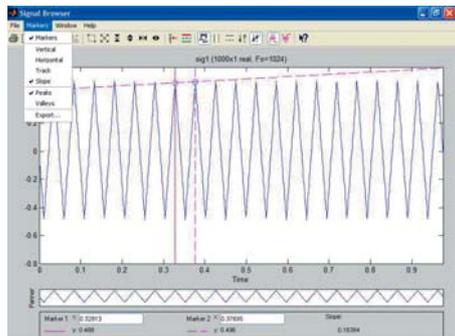


Рис. 12. График исследуемого сигнала с курсорами и линией наклона

Ввиду симметрии спектра, часто область отрицательных частот может не показываться. Простым этот вид спектрального анализа кажется только с первого взгляда. Надо иметь в виду, что масштабы спектра могут быть линейными и логарифмическими, применяются спектры напряжения, квадрата напряжения, его модуля, мощности, фазы и т.д. Различен выбор окон. Спектры нередко сильно отличаются по виду и способны легко запутать не слишком опытного пользователя. К тому же, есть ряд специальных методов спектрального оценивания, улучшающих вид спектральных пиков, сглаживающих спектры, уменьшающих уровень шумов, сглаживающих пики спектра и т.д.. Все они имеются в пакете расширения системы MATLAB Signal Processing Toolbox.

ИНСТРУМЕНТ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА SPTOOL СИСТЕМЫ MATLAB

Пакет расширения Signal Processing Toolbox имеет прекрасный профессиональный инструмент спектрального анализа SPTool, реализованный средствами графического интерфейса пользователя (GUI) и избавляющий пользователя от необходимости программирования задач спектрального анализа — порою довольно тонких и трудоемких. Хотя, возможности программирования сохраняются в полной мере.

Запуск инструмента SPTool производится командой `sptool` (рис. 11). Это приводит к появлению окна, имеющего три панели: Signals (браузер сигналов), Filters (браузер фильтров — в рамках данной статьи не рассматривается) и Spectra (браузер спектров). Для работы с SPTool надо загрузить в него (с помощью позиции Import меню File) создан-

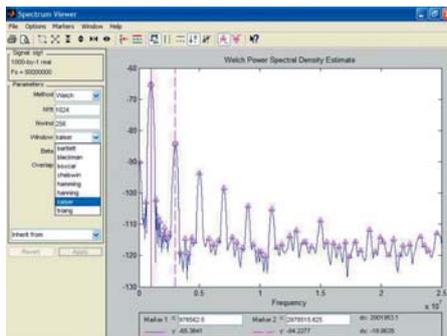


Рис. 13. Спектр треугольного сигнала, полученный методом Уэлча с окном Кайзера

ный программой `osc` вектор данных осциллограммы и значение частоты дискретизации F_s . Это делается с помощью окна импорта данных, показанного на рис. 11 справа от окна инструмента. Загрузка возможна из рабочего пространства Workspace или с диска.

Для просмотра графика загруженного сигнала (в нашем случае это треугольный сигнал с частотой 1 МГц и двойной амплитудой 1 В) достаточно в разделе Signals выбрать загруженные данные и активизировать кнопку View (Просмотр). Появится окно с графиком сигнала, которое в полностью открытом виде показано на рис. 12. В окне возможны полноценные курсорные измерения и вывод линии наклона, проведенной через две точки, указанные курсорами. Возможен и поиск всех пиков и впадин кривой, представляющей временную зависимость сигнала.

ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРА В MATLAB РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Если при реализации метода спектрального анализа (оценивания) не использована информация о статистике шума и сигнала, то реализующие это методы относятся к непараметрическим методам. Как правило, они не способны сильно подавлять шумы в нижней части спектра, зато хорошо выделяют его пики. К таким методам относится метод Уэлча (Welch) и обычный метод быстрого Фурье-преобразования (FFT).

Для просмотра спектра в разделе Spectra окна надо активизировать кнопку Create (Создать) и затем View (Просмотр). Окно просмотра спектра в полностью открытом виде показано на рис.

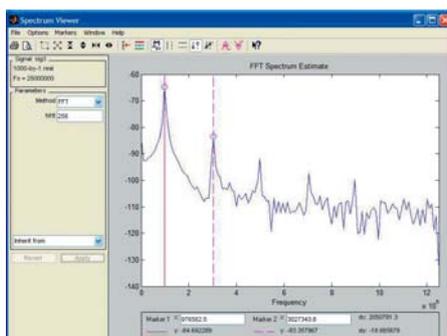


Рис. 14. Спектр треугольного импульса, полученный стандартным методом FFT

13. По умолчанию строится спектр по методу Уэлча. Можно выбрать одно из восьми окон (в нашем случае это окно Кайзера). Спектр имеет один большой пик, соответствующих частоте синусоидального сигнала 1 МГц и затем пики на частотах 3, 5, 7 и т.д. МГц (треугольный сигнал, будучи симметричным, теоретически имеет только нечетные гармоники). Есть возможность курсорных измерений. Спектр строится в реальном (а не нормированном) масштабе по частоте и уровню (в децибелах мощности).

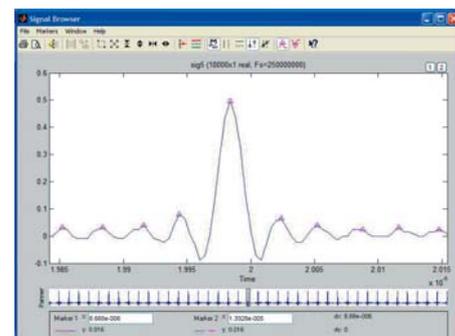


Рис. 15. Сигнал типа $\sin(x)/x$, при $x=2\pi ft/\tau$ ($f=1$ МГц)

Классическим, и обычно применяемым в цифровых осциллографах, является метод быстрого Фурье-преобразования (БПФ или FFT). Используя прямоугольное окно, этот метод дает очень острые пики спектра с пологом спадам, что затрудняет оценку амплитуды гармоник сигнала, но позволяет точно определять их частоты. Сливающиеся основания пиков имеют широкую шумовую дорожку. Вид спектра синусоиды каждой гармоники далек от идеального. Реализация этого метода в MATLAB показана на рис. 14.

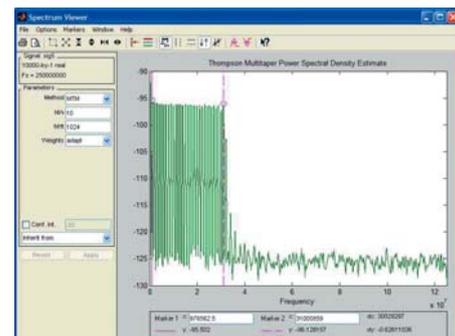


Рис. 16. Спектр сигнала рис. 15 полученный методом MTM

Иногда требуется высокое разрешение спектрального анализа. Например, если надо оценить спектр сигналов типа $\sin(x)/x$, при $x=2\pi ft/\tau$. Такой сигнал, при длине осциллограммы в 10000 точек, показан на рис. 15 в нижней части окна сигнала. В верхней части этот сигнал представлен в режиме «лупы времени». Этот сигнал уникален — он дает гармоники с равной амплитудой в диапазоне частот до $1/\tau$.

Этот сигнал уникален — он дает гармоники с равной амплитудой в диапазоне частот до $1/\tau$. После этого

уровень гармоник резко падает до нулевого. Очень хорошее выделение пиков спектра для сложных сигналов, подобных приведенному на рис. 15, дает многооконный (со многими звеньями) метод (МТМ) (рис. 16). Число окон задается параметром NW. Метод хорошо подходит для оценки амплитуды пиков спектров видеосигналов, но, ввиду плоской верхушки пиков, оценивает частоты пиков с умеренной точностью. Рис. 16 иллюстрирует применение курсоров для оценки амплитуд гармоник.

Сигналы, реально применяемые в электросвязи и радиотехнике, нередко сильно засорены шумами. Поэтому были предложены и специальные методы спектрального анализа, позволяющие сглаживать спектры и очищать их от шума. Это параметрические методы, основанные на учете статистики шума. Некоторые из них основаны на идее авторегрессии (AR). К таким методам относятся ковариационный и модифицированный ковариационный методы. На рис. 17 представлен спектр синусоиды, полученной модифицированным ковариационным методом. Шумы в нижней части спектра при этом сильно подавлены (особенно высокочастотные), а спектр сильно сглажен.

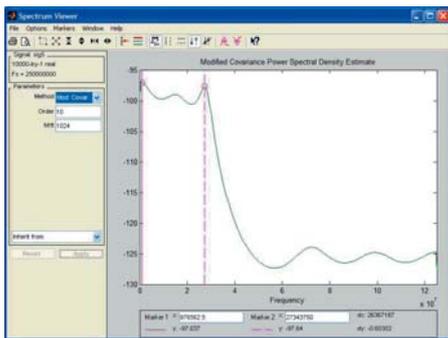


Рис. 17. Спектр, полученный модифицированным ковариационным методом

Бликие результаты дает метод Берга и Юла-Уокера а также метод классификации множественных сигналов MUSIC. Все эти методы заметно сглаживают спектры и сильно ослабляют шумы. Тонкие детали спектров при этом сглаживаются, пики превращаются в волнообразные линии спектра. Все эти методы нетрудно опробовать в SPTool.

ОЦЕНКА В MATLAB СПЕКТРА РЕАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В ВИДЕ ПАЧЕК

Фурье-анализ сыграл выдающуюся роль в начале применения электросвязи и радиосвязи, в устройствах которых широко использовались синусоидальные сигналы с медленным изменением их параметров и с разными частотами. Но уже радиолокация, использующая радиоимпульсы в виде пачек синусоид, одной из первых выявила несовершенство спектрального анализа на основе Фурье-преобразований. Пачка сигналов даже простой формы до неузнава-

мости меняет спектр исходного сигнала, из которого она вырезана.

Для оценки таких сигналов был предложен метод короткого оконного Фурье-анализа. Иногда его называют коротким или кратковременным (SFFT). Его суть в том, что используется окно не во всю длину осциллограммы, а намного более короткое. Вычисляются спектры кусков сигнала — при перемещении окна по осциллограмме от ее начала к ее концу. Таким

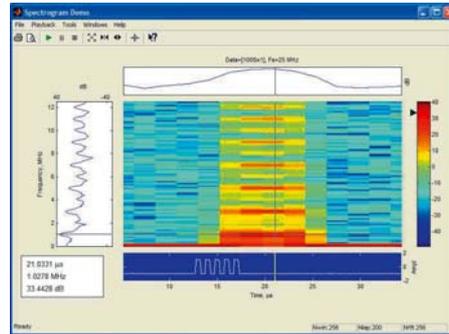


Рис. 18. Просмотр спектрограммы пачки из пяти прямоугольных импульсов с помощью инструмента `specgramdemo`

образом, появляется возможность построения спектра в системе трех координат: время-частота-амплитуда. Амплитуда обычно задается цветом прямоугольника на плоскости время — частота (номер окна). Полученное представление сигнала называется спектрограммой.

В пакете расширения Signal Processing Toolbox СКМ MATLAB есть две почти равноценные функции построения спектрограмм — `specgram` и `specrogram`. Вторая функция была введена позже, но современные версии MATLAB поддерживают обе функции. С деталями их синтаксиса и тонкостями задания можно ознакомиться по книге [5] или по справке конкретной версии MATLAB.

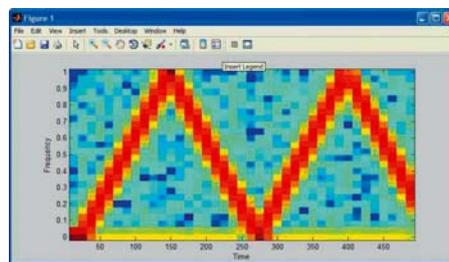


Рис. 19. Спектрограмма частотно-модулированного сигнала

Специальное средство `specgramdemo` служит для демонстрации возможностей спектрограмм на готовых примерах. Однако при его запуске командой `specgramdemo(ydata,Fs)` можно строить спектрограммы реальных сигналов, вектор `ydata` которых и частота дискретизации `Fs` которых создаются программой `osc` (рис. 18). Перемещаемое перекрестие позволяет оценить частоту и время в любой точке спектро-

граммы, а также уровень спектральной плотности. Пачка в сигнале легко выделяется цветом.

СПЕКТРОГРАММА ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

Ахиллесовой пятой цифровых осциллографов стало наблюдение модулированных высокочастотных сигналов. Они имеют очень длинную линию, для представления которой необходимо очень большое число точек. В результате осциллограмма сигнала выглядит как широкая сплошная полоса, в которой разглядеть сигнал и его изменение практически невозможно — особенно при частотной модуляции (ЧМ).

Спектрограмма ЧМ-сигнала (рис. 19), полученная при выполнении команды `specgram(ydata,50,Fs)`, позволяет отчетливо получить эти данные с конечным разрешением, зависящим от числа окон (в нашем примере из 50) и их размера. Если не указан параметр `Fs`, то частотная и временная шкалы задаются безразмерными (нормированными). Отчетливо закон изменения модулирующего ЧМ-сигнала по пилообразному (треугольному) закону.

Вывод из описанного вполне очевиден — применение СКМ MATLAB резко расширяет возможности обработки реальных осциллограмм, как классическими методами (реализованными в цифровых осциллографах), так и специальными методами, которые пока реализуются только в СКМ. Особенно важен спектральный анализ реальных осциллограмм большим числом современных методов. По числу методов, применяемых окон и видов графики MATLAB намного превосходит возможности даже дорогих цифровых осциллографов. Легко интегрируясь с ними, MATLAB делает доступными эти методы их пользователям. Нередко это способно резко удешевить сложные измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов В. П. Компьютерная математика. Теория и практика. М.: Нолидж. 2001. 1296 с.
2. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: СОЛОН-Пресс. 2009. 248 с.
3. Дьяконов В. П. Работа цифровых осциллографов TDS1000B/2000B с системой компьютерной математики MATLAB. Схемотехника, 2007, № 7, № 8.
4. Дьяконов В. П. Современные методы Фурье- и вейвлет-анализа и синтеза сигналов. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2009, № 2, стр. 25.
5. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. М. СОЛОН-Пресс. 2005. 576 с.
6. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы импульсов. М.: ДМК-Пресс. 2009. 384 с. ☑