УДК 621.395

ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ И ФОРМИРОВАНИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

С.И. Дингес, доцент МТУСИ, к.т.н.
М.В. Комаров, аспирант МТУСИ
А.В. Пестряков, декан факультета «Радио и телевидение» МТУСИ, д.т.н.
А.Е. Смирнов, старший научный сотрудник НИЛ-30 МТУСИ, к.т.н.

Используемые в современных цифровых системах связи и вещания сигналы, как правило, имеют сложную структуру. Кроме того, из-за «неидеальности» характеристик узлов, применяемых в радиочастотном оборудовании, нарушается «тонкая» структура сложных сигналов. С помощью традиционных методов изучения сигнала во временной и спектральной областях исследовать такие нарушения не всегда удобно. Как временная, так и спектральная форма представления сложных сигналов не позволяют определить степень искажения сигнала, возникающего при прохождении РЧ-трактов, особенно с учетом случайного характера реальных сигналов. Из практики же известно, что даже незначительное нарушение «тонкой» структуры сложного сигнала в РЧ-трактах приводит к заметному ухудшению качества функционирования системы связи или вещания в целом.

Введение. Традиционные методы оценки качества тестируемых устройств не дают реальной картины функционирования конкретного узла в составе РЧ-блока и его возможного вклада в ухудшение качества формируемого сигнала. Для выявления повреждений «тонкой» структуры сигнала необходимо использование новых более точных и чувствительных параметров и характеристик, в том числе и статистических, широко применяемых в настоящее время. Нахождение таких показателей качества, как амплитуда вектора ошибки — EVM (Error vector magnitude), коэффициент мощности, проникающей в соседний канал — ACLR (Adjacent Channel Leakage power Ratio), кривая интегральной функции распределения — CCDF (complementary-cumulative-distribution-function [1,2], являющихся важнейшими для новых и перспективных систем связи, представляется возможным только с помощью новейшей, чрезвычайно дорогой измерительной техники.

Каждый из традиционных измерительных приборов имеет ограниченный ряд функций, таких как формирование сигналов с заданным набором изменяемых параметров, или анализ и измерение тех или иных параметров сигналов. Характерная тенденция последних лет — переориентация исследователей и разработчиков с использования комплектов традиционных измерительных приборов на применение универсальных и автоматизированных *компьютеризированных комплексов.* На этот путь выходят все мировые компании-производители измерительного оборудования, для которых традиционный подход к исследованиям и разработкам становится неэффективным. В российских же условиях это направление создания инструментария для научных исследований, технических разработок и изучения телекоммуникационных устройств и систем представляется, пожалуй, единственно возможным.

Проблеме повышения эффективности научных исследований и технических разработок путем широкого использования их автоматизации и компьютеризации в последнее время уделяется большое внимание, как в нашей стране, так и за рубежом. Приоритетное значение этому направлению придают практически все зарубежные компании, разрабатывающие электронные РЧ-компоненты, радиотехническое и контрольно-измерительное оборудование. В то же время известно сравнительно немного коллективов, ведущих исследование и разработку подобных комплексов, применительно к телекоммуникационным системам и устройствам. Причем все они являются крупнейшими зарубежные компаниями: Agilent, Rohde&Schwarz, Aeroflex. Проявляют заметный интерес и ведут разработки в этой области и компании-разработчики оборудования связи — Nokia, SonyEricsson, Infineon и др.

Практическая реализация АПК. В научном центре МТУСИ разработан *пакет прикладных программ* аппаратно-программного комплекса (АПК) «Вектор», предназначенного для формирования (Вектор-VSG) и векторного анализа (Вектор-VSA) сигналов современных систем связи и вещания, тестирования отдельных функциональных узлов, радиочастотных блоков и устройств в целом.

Подобный комплекс может быть использован для исследования, разработки и изучения перспективных телекоммуникационных и вещательных устройств и систем. Комплекс способен заменить целый ряд сложных и дорогих измерительных приборов, предназначенных для генерирования и измерения параметров сигналов. Переход к таким комплексам позволит оперативно реагировать на стремительно изменяющуюся ситуацию в теории, технике и стандартизации систем и устройств телекоммуникаций и обеспечить исследователей и разработчиков адекватным инструментарием.

Разрабатываемый комплекс базируется на использовании универсальных интерфейсов как в трактах ввода-вывода информации в ЭВМ, так и при обращении к нему пользователей. В процессе разработки и функционирования комплекса предусматривается подключение к основной программе различных модулей, оформляемых в виде динамических библиотек. В зависимости от решаемых задач назначение и набор таких модулей может быть самым разнообразным. Так, при исследовании телекоммуникационных устройств применяются модули формирования необходимых типов сигналов, которые подаются через соответствующие интерфейсы на исследуемую компьютерную модель или физическое устройство, а также модули графического отображения сигналов во временной, спектральной или векторной форме. При анализе телекоммуникационных систем добавляются модули, задающие модели каналов, а также модули оценки показателей качества принимаемых сигналов.

Такой подход позволяет не только существенно ускорить исследования и разработку телекоммуникационных устройств и систем, но и существенно повысить точность и достоверность получаемых результатов за счет применения самых современных и эффективных алгоритмов формирования и обработки сигналов.

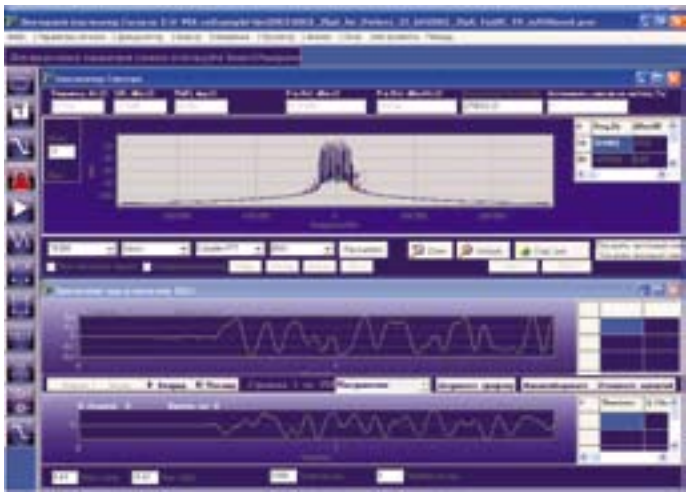

Рис. 1

Основная программа векторного анализа сигналов «Вектор-VSA» дает возможность производить всесторонний анализ модулированных сигналов, вычисление различных параметров и характеристик. Работа с программой осуществляется с использованием ряда окон (рис. 1). При этом могут быть выбраны различные формы отображения сигнала: сигнальное созвездие или векторная диаграмма, временное отображение квадратурных компонентов сигнала, амплитудные и фазовые спектры и т. п.

Универсальный пользовательский интерфейс позволяет отображать сигнал во временной, спектральной и векторной областях. С помощью современных алгоритмов и программных модулей можно находить все необходимые параметры сигналов и оценивать ключевые показатели качества сигналов современных и перспективных телекоммуникационных и вещательных стандартов и технологий

В состав АПК «Вектор» входит также программа векторного формирования сигналов «Вектор-VSG», позволяющая получать как простые (тестовые), так и модулированные сигналы, используемые в наиболее распространенных стандартах и технологиях, таких как: BPSK, QPSK, 8-PSK; 16-PSK, 64-PSK, FSK, MSK, GMSK, QAM (4, 8, 16, 32, 64, 128, 256) и т. п. с возможностью записи их в файлы популярных форматов — ASCII и *.pcм.

Специфика работы IQ-модуляторов подразумевает хранение данных сформированных сигналов в виде отсчетов I и Q компонент, что в ряде случаев дает возможность упростить процедуру программно-математической обработки сигналов (введение искажений, контроль параметров сигналов и т. д.), позволяющей снизить требования к вычислительным ресурсам, а также повысить достоверность и точность получаемых данных.

В общем случае процесс формирования реальных сигналов условно можно разделить на следующие процедуры:

- генерирование отсчетов модулированного сигнала;
- введение искажений;
- фильтрация с помощью предмодуляционного (Tx) фильтра.

В программе «Вектор-VSG» предусмотрено формирование простых (тестовых) тоновых сигналов и задание их основных параметров. Программа позволяет генерировать колебания заданных частот, амплитуд и начальных фаз, а так же задавать количество отсчетов на период и длину последовательностей.

В «Вектор-VSG» производится генерирование большого числа разновидностей угловой модуляции [3]. Одними из наиболее распространенных в настоящее время являются сигналы многопозиционной фазовой манипуляции. Математически такой сигнал можно представить в виде:

$$S(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t), \qquad (1)$$

где

$$I(t) = A\sum_{k=-\infty}^{\infty} U_{T_S}\left(t - kT_S\right)\cos\phi_k;$$

$$Q(t) = A\sum_{k=-\infty}^{\infty} U_{T_S}\left(t - kT_S\right)\sin\phi_k;$$

U_{T_S} — импульс прямоугольной формы с длительностью T_s и единичной энергией; f_c — частота несущего колебания; φ_k — принимает значения из множества $\left\{\frac{2\pi}{M}(i-1), i = \overline{1, M}\right\}$; M — размер алфавита передаваемых символов.

Программа «Вектор-VSG» позволяет задать символьную скорость, количество выборок на символ, генерируемые символы, опорный уровень сигнала, а также определить источник данных. В качестве источника может выступать как псевдослучайная, так и задаваемая пользователем последовательность данных. Кроме того, предусмотрена возможность задания последовательности данных из файла. Аналогичным образом реализуется генерирование FSK- и QAM-сигналов.

Формируемые последовательности представлены в виде отсчетов квадратурных IQ компонент. Для программы «Вектор-VSG» разработаны модули отображения сигналов во временной области и на IQ-плоскости.

В программе «Вектор-VSG» предусмотрено ведение дополнительных сервисных возможностей, позволяющих исследовать сигналы, максимально приближенные к реальным. В частности, в любом телекоммуникационном устройстве помимо полезного сигнала присутствуют шумы и помехи.

На рис. 2 изображено сигнальное созвездие QPSK-сигнала с добавлением аддитивного Гауссовского шума.

Существует возможность добавления различного рода искажений, таких как: шумы тракта формирования сигнала и тракта опорного сигнала, сдвиг сигнала (DC offset), фазовая

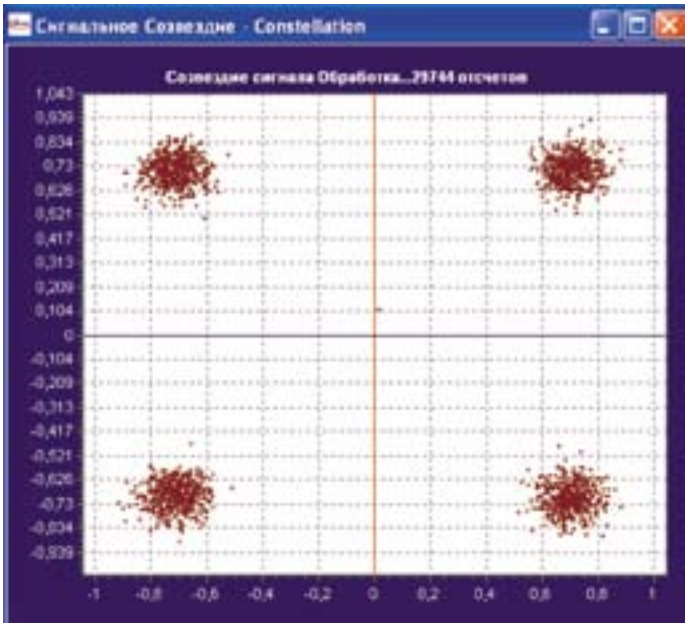

Рис. 2

ошибка (Phase error), амплитудный разбалланс (IQ imbalance), частотный сдвиг (Frequency deviation).

В программе имеется модуль предмодуляционной фильтрации сигналов. В настоящее время наибольшее использование получили несколько типов фильтров.

Гауссовский фильтр с изменяемым параметром BT:

$$h(t)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2T^2}\right), \qquad (2)$$

где

$$\sigma=\frac{\sqrt{\ln(2)}}{2\pi BT};$$

B — частота среза; T — длительность символьной последовательности.

RRC-фильтр:

$$h(t)=4\alpha\frac{\cos\left((1+\alpha)\pi t/T\right)+\dfrac{\sin\left((1-\alpha)\pi t/T\right)}{4\alpha t/T}}{4\sqrt{T}\left((4\alpha t/T)^2-1\right)}. \qquad (3)$$

RC-фильтр:

$$h(t)=\frac{\sin\left(\pi t/T\right)}{\pi t/T}\frac{\cos\left(\pi\alpha t/T\right)}{\left(1-4\alpha^2t^2/T^2\right)}, \qquad (4)$$

где T — длительность бита данных, α — коэффициент расширения спектра.

Пользователь может применить ряд стандартных фильтров **с** параметрами, соответствующими нормативным документам нескольких стандартов связи: GSM, EDGE, WCDMA и т. п. (рис. 3). Предусмотрено использование идеального фильтра низких частот и *пользовательских фильтров,* т. е. фильтров, определенных пользователем с помощью других средств моделирования и представленных в виде файла.

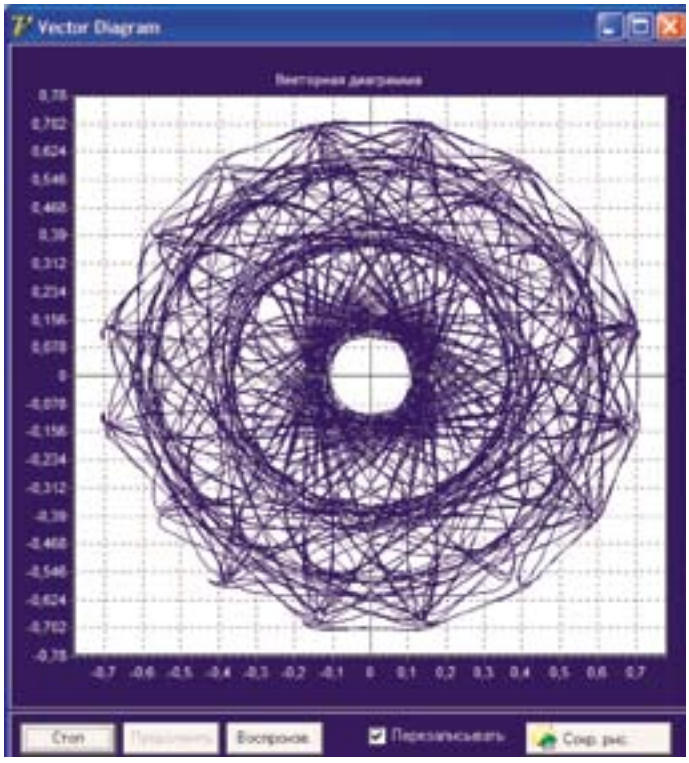

Рис. 3

Для тестирования создаваемого программного продукта и его последующего применения была создана *библиотека тестовых сигналов*, имеющих как сравнительно простую структуру, так и полностью соответствующую требованиям ряда стандартов связи: 1xEVDO, 3GPP, IS95 (CDMA), CDMA2000, TDSDMA, WLAN (802.11a, 802.11b, 802.11g), TDMA (GSM, EDGE) и т. п. . Эти сигналы позволяют проводить измерение основных параметров модулированных сигналов (EVM, ACLR, CCDF, FREQUENCY ERROR, BER, FER, и др.) при воздействии дестабилизирующих факторов канала связи (шумы, помехи, многолучевость), а также учитывать различного рода искажения, возникающие в процессе формирования и обработки сигналов. Файлы тестовых сигналов имеют структуру популярного формата *.pcм. Эти файлы обладают достаточно сложной структурой данных и отвечают требованиям различных стандартов. В тестовые сигналы введены различные виды искажений.

Помимо исследований и разработок радиооборудования, создаваемый комплекс позволяет решать *задачи обучения* передовым телекоммуникационным технологиям в образовательных учреждениях, где вопросы обеспечения современным оборудованием в условиях скудного финансирования стоят наиболее остро. Широкое использование комплекса позволит проводить конкурентоспособные исследования и разработки в области телекоммуникаций, а также в максимально короткие сроки внедрять в образовательные программы последние достижения в этой области.

Заключение. Ближайшим и наиболее актуальным направлением работы по совершенствованию АПК является *сопряжение программной части с универсальными аппаратными средствами* оцифровки и ввода/вывода информации. Кроме того, планируется пополнение библиотек формируемых в АПК сигналов и моделируемых систем, создание новых типов модулированных сигналов и усложнение структур формируемых сигналов с учетом конкретных требований нормативных документов современных систем связи и вещания. Предполагаются реализации автоматизированной и дистанционной работы с АПК с использованием команд TCP/IP.

ЛИТЕРАТУРА

1. **3GPP TS 25.101 V6.5.0 (2004-09).** Technical Specification 3rd Generation Partnership Project; User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD). Release 6. — P. 119.
2. **GSM 05.08:** «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio subsystem link control». European Standard (Telecommunications series), version 8.0.0. Release 1999. — P. 85.
3. **Журавлев В.И.** Методы модуляции — демодуляции радиосигналов при передаче цифровых сообщений / Учебное пособие. — М.: МТУСИ, 2000. — 117 с.
4. **Прокис Дж.** Цифровая связь / Пер. с англ. под ред. **Д.Д. Кловского.** — М. Радио и связь, 2000. — 800 с.
5. **Феер К.** Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. —М.: Радио и связь, 2000. — 520 с.

Получено 27.03.08