УДК 621.396.41

## К.В. Волков, С.В. Мелихов

# Алгоритм тестирования цифрового радиочастотного оборудования

Предложен алгоритм тестирования цифрового связного оборудования, основанный на оценке качественных характеристик радиосигнала с помощью векторного анализатора сигналов. Приведены результаты моделирования влияния различных неисправностей на качественные характеристики радиосигнала и результаты экспериментального тестирования цифрового передатчика с использованием векторного анализатора сигналов FSV фирмы Rohde & Schwarz. Ключевые слова: векторный анализатор сигналов, частота битовой ошибки, вектор ошибки, диаграмма «созвездие», векторная диаграмма.

Современные технологии стремятся к минимизации габаритных размеров конечного устройства и снижению энергопотребления. Технология реализации полнофункционального устройства внутри одной микросхемы System-on-Chip (SoC) позволила снизить энергопотребление и уменьшить габаритные размеры, но при этом существенно усложнился процесс тестирования и ремонта устройств. Цифровые приемники и передатчики, выполненные по технологии SoC, не предоставляют доступа к внутренним блокам и контрольным точкам для наблюдения сигналов. Таким образом, получая неудовлетворительные показатели частоты битовой ошибки (BER – Bit Error Rate; подробно методы измерения BER изложены в [1]), разработчики не имеют возможности определить вид неисправности, используя стандартные анализаторы спектра радиосигнала. Обнаружить неисправность можно при использовании векторного анализатора сигналов (BAC), который способен демодулировать радиосигнал с выхода передатчика и декодировать его в соответствии с выбранным стандартом. В данной статье предложен алгоритм тестирования цифрового связного оборудования, основанный на оценке качественных характеристик радиосигнала с помощью BAC. В таблице приведены основные качественные характеристики, предоставляемые BAC.

Название	Описание
Глазковая	Характеризует суммарный вид всех символьных периодов измеряемого
диаграмма	участка сигнала, наложенных друг на друга; позволяет оценить работу
	опорных генераторов и цепей восстановления символьной скорости
Векторная	Характеризует величину мгновенной мощности сигнала в двумерной ком-
диаграмма	плексной плоскости
Диаграмма	Характеризует принятые символы в двумерной комплексной плоскости
«созвездие»	относительно идеальных символьных положений
Спектрограмма	Характеризует зависимость спектральной плотности мощности сигнала от
	времени

#### Качественные характеристики, предоставляемые ВАС

Кроме того, векторный анализатор сигналов производит расчет ошибок амплитуды, ошибок фазы, вектора ошибки (Error Vector – EV; подробные сведения о векторе ошибки изложены в [2]) и позволяет просматривать изменение этих ошибок с течением времени.

**Алгоритм тестирования.** Алгоритм тестирования заключается в сопоставлении совокупности искажений качественных характеристик исследуемого радиосигнала неисправностям внутренних блоков цифрового приемника и передатчика.

Алгоритм состоит из нескольких «шагов» и начинается с проверки динамического диапазона выходной цепи передатчика и входной цепи приемника, в которых расположены усилители.

По векторной диаграмме и временной характеристике EV оценивается влияние сжатия сигнала в усилителях на качество модуляции. Если в моменты наибольшей мгновенной мощности сигнала (в точках, наиболее удаленных от центра векторной диаграммы) резко возрастает значение EV, это означает, что сжатие сигнала приводит к недопустимым искажениям и ухудшает декодирование (приводит к увеличению BER) [3].

Если исследование векторной диаграммы и временной зависимости EV не показало наличие неисправностей в усилителях, необходимо приступить к проверке цепей понижения / повышения частоты и фильтров промежуточной частоты (ПЧ). Неисправность может заключаться в несоответствии частотных характеристик фильтров ПЧ и, следовательно, в отличии групповой задержки сигнала требуемому значению, что приводит к возникновению ошибок на стадии декодирования сигнала. Для обнаружения такой неисправности необходимо исследовать величину рассеяния измеренных символов вокруг идеальных символьных положений на диаграмме «созвездие» и временную зависимость EV. Постоянный во времени чрезмерный уровень величины EV при наличии постоянного повышенного уровня рассеяния точек на диаграмме «созвездие» свидетельствует о неисправности фильтров. Для большей достоверности необходимо протестировать характеристики фильтров ПЧ отдельно, используя доступные средства отладки SoC.

Смесители в блоках повышения и понижения частоты могут быть источниками значительных по уровню комбинационных (мешающих, интерферирующих) сигналов, которые искажают форму символов и затрудняют декодирование. Наличие рассеяния на диаграмме «созвездия» совместно с периодическими изменениями EV во времени свидетельствует о присутствии в канале интерферирующих сигналов. Для определения частот интерферирующих сигналов, что даст возможность определить причину их возникновения, необходимо рассмотреть частотную характеристику EV, получаемую векторным анализатором спектра путем преобразования Фурье от временной характеристики EV.

Результаты моделирования в среде MatLab влияния интерферирующих сигналов на временную характеристику EV, частотную характеристику EV и диаграмму «созвездие» приведены на рис. 1, a-e. В полезный радиосигнал S(t) подмешаны два интерферирующих гармонических сигнала с частотами 50, 100 кГц и амплитудами A, B:



$$S'(t) = S(t) + A\sin(2\pi \cdot 50 \times 10^3 \cdot t) + B\sin(2\pi \cdot 100 \times 10^3 \cdot t) .$$
(1)

Рис. 1. Результат влияния интерферирующих сигналов: a – на временную характеристику вектора ошибки;  $\delta$  – частотную характеристику вектора ошибки; e – диаграмму «созвездие»

На рис. 1, *а* представлена временная зависимость EV в комплексной плоскости – вектор ошибки увеличивается и «кружит» вокруг точки (0,0). Такой эффект трудно отличить от обычного рассеяния при неисправном фильтре ПЧ или сильной зашумленности сигнала, но, исследовав частотную характеристику вектора ошибки (рис. 1,  $\delta$ ), становится очевидным наличие двух интерферирующих сигналов с частотами 50 и 100 кГц. Их наличие приводит к рассеянию символов вокруг идеальных символьных положений (рис. 1,  $\epsilon$ ).

Если вышеописанные неисправности не обнаружены, необходимо перейти к исследованию искажений квадратурной модуляции и демодуляции. Возможны следующие виды искажений квадратурной модуляции: смещение квадратур, рассогласование усиления квадратур, фазовый сдвиг квадратур. Наиболее удобным средством исследования искажений квадратур является диаграмма «созвездие». Результаты моделирования приведены на рис. 2, *a*, *б*.

При смещении квадратуры Q на некоторую положительную величину C символы сигнала на диаграмме «созвездие» смещаются по оси Q относительно идеальных положений (см. рис. 2, a), поскольку в этом случае радиосигнал представляется в виде

$$S(t) = I(t) \cdot \cos\omega t - Q'(t) \cdot \sin\omega t = I(t) \cdot \cos\omega t - [C + Q(t)] \cdot \sin\omega t , \qquad (2)$$

где I(t), Q(t) – знакопеременные модулирующие цифровые потоки соответственно синфазного и квадратурного каналов модулятора передатчика.



Рис. 2. Диаграмма «созвездие»: а – при смещении квадратур; б – рассогласовании усиления квадратур

При рассогласовании усиления (например, при меньшем усилении сигнала в канале Q) символы диаграммы «созвездие» сжимаются по оси Q относительно идеального положения (см. рис. 2,  $\delta$ ), по-скольку в этом случае радиосигнал представляется в виде

$$S(t) = I(t) \cdot \cos\omega t - Q'(t) \cdot \sin\omega t = I(t) \cdot \cos\omega t + D \cdot Q(t) \cdot \sin\omega t , \qquad (3)$$

(4)

где *D* < 1.

При сдвиге фаз ( φ ) между квадратурами нарушается условие ортогональности квадратурных составляющих, что приводит к изменению величин символов и к повороту диаграммы «созвездие» относительно идеальной сетки (рис. 3), поскольку в этом случае радиосигнал можно представляется в виде:

$$S(t) = I(t) \cdot \cos \omega t - Q(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$
.

В заключение необходимо проверить соответствие стандарту характеристику фильтров огибающей передатчика-приемника. Особенно это важно для систем, сквозная характеристика фильтров огибающей которых имеют форму «приподнятого косинуса». В случае ее несоответствия «приподнятому косинусу» возникает



при фазовом сдвиге квадратур

межсимвольная интерференция [4], которая вызывает увеличение EV в моменты перехода между символами, что наглядно обнаруживается векторным анализатором сигналов.

Экспериментальная часть. Предложенный алгоритм был проверен на практике с использованием векторного генератора сигналов SMBV100A и векторного анализатора сигналов FSV фирмы Rohde & Schwarz. Генератор сигналов SMBV100A использовался в качестве передатчика, что позволило вносить в высокочастотный сигнал различные виды искажений. На рис. 4, 5 приведены некоторые результаты тестирования.



Рис. 4. Диаграмма «созвездие» с монитора ВАС: *а* – при смещении квадратур; *б* – при рассогласовании усиления квадратур



Рис. 5. Диаграмма «созвездие» с монитора ВАС при фазовом сдвиге квадратур

Заключение. По предложенному в данной статье алгоритму и анализу качественных характеристик векторного анализатора сигналов возможно выявление неисправностей внутренних блоков цифровой системы передатчик-приемник, построенной по технологии SoC. Результаты эксперимента совпали с результатами моделирования. Предложенный алгоритм применим как на стадии разработки новых реализаций цифрового связного оборудования сотовой связи, широкополосного доступа Интернет, цифрового телерадиовещания и пр., так и на стадии ремонта этого оборудования. Кроме этого, предложенный алгоритм целесообразно использовать в автоматизированной системе тестирования цифрового связного оборудования в качестве основы для экспертной системы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07.09.2010 и договором 74/10 от 15.07.2010 г. в порядке реализации Постановления №218 Правительства РФ.

### Литература

1. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.

2. Using Error Vector Magnitude Measurements to Analyze and Troubleshoot Vector-Modulated Signals [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.home.agilent.com/agilent/redirector.jspx? action=ref&cname=Agilent\_editorial&ckey=1000000310%3Aepsg%3Aapn&lc=eng&cc=US&nfr=34959.0.00, свободный (дата обращения: 13.12.2010).

3. Testing and Troubleshooting Digital RF Communications Receiver Designs [Электронный pecypc]. – Режим доступа: http://www.home.agilent.com/agilent/application.jspx?nid=34787.0.00 &cc=RU&lc=rus&t=80030.k.1&co=153655.i.2,180838.f.0&pageMode=AN, свободный (дата обращения: 13.12.2010).

4. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

## Волков Константин Валерьевич

Аспирант каф. средств радиосвязи ТУСУРа Тел.: (382-2) 41-37-09 Эл. почта: kv.russia@gmail.com

## Мелихов Сергей Всеволодович

Зав. каф. средств радиосвязи ТУСУРа Тел.: (382-2) 41-37-09 Эл. почта: mrc@main.tusur.ru

## Volkov K.V., Melikhov S.V. Algorithm for testing the digital radio-frequency equipment

The article discusses methods of test equipment for digital radio communications of GSM standard, using visual and numerical tools provided by the vector signal analyzer. **Keywords:** BER, cancellation, GSM, VSA.