

Общее решение для OFDM-измерений

Представлено общее решение для OFDM-измерений в анализаторах сигналов. Широкий диапазон OFDM-систем может быть задан по позициям пилот-сигналов и по модуляции данных. Тракт обработки сигнала состоит из блока синхронизации, блока оценки параметров и блока измерений. Для достижения наилучшей точности используются как метод максимального правдоподобия, так и метод минимального СКО. Отдельные результаты измерений дают представление о качестве модуляции переданного радиосигнала или модулирующих сигналов.

Грегор ФЕЛДХАУС
(Gregor FELDHAUS)

gregor.feldhaus@rohde-schwarz.com

Введение

В настоящее время решения для OFDM-измерений в серийных анализаторах сигналов определяются конкретными стандартами. Эти решения используются с испытываемыми устройствами, которые соответствуют требованиям стандартизованных систем (например, WLAN или WiMAX). Работа таких демодуляторов основана на использовании преамбулы специального вида (для синхронизации по времени) и фиксированного местоположения пилотных сигналов (для канальной оценки и слежения за фазой).

В отличие от существующих решений, мы разработали универсальную систему измерений для анализа сигналов OFDM и OFDMA [1]. Она содержит универсальный язык описания, который используется для определения системы OFDM во временной и частотной областях. Разнообразные настройки управления позволяют адаптировать последовательность обработки сигнала к различным типам приемников. Данное решение будет полезно инженерам-разработчикам на ранних стадиях разработки новых стандартов при исследовании влияния системных параметров на качество модуляции. Инженеры-испытатели могут использовать универсальные OFDM-сигналы для оценки работы аналогового оборудования (например, усилителей мощности), не заботясь о точной реализации используемого стандарта.

Конфигурация оборудования

Программное обеспечение анализатора работает на внешнем ПК и управляет работой анализатора сигналов дистанционно, по локальной сети (LAN) или по шине GPIB. Прибор может работать с радиосигналами частотой до 40 ГГц [2]. Несколько каскадов смесителей осуществляют перенос радиосигнала (сигнала ВЧ) на промежуточную частоту

(ПЧ) 20,4 МГц, затем сигнал оцифровывается АЦП с частотой дискретизации 81,6 МГц. Возможно также использование плат расширения, которые увеличивают частоту дискретизации до 326,4 МГц при использовании ПЧ 81,6 МГц. Дальнейшая обработка сигнала (после АЦП) осуществляется с помощью цифровых устройств, реализованных на базе ASIC и FPGA. Генератор с числовым управлением сдвигает сигнал с ПЧ в полосу частот модулирующих сигналов, за ним следует полуполосный фильтр и дробный преобразователь частоты дискретизации. Путем программирования преобразователя, объединенного со следующим за ним фильтром децимации, на выходе можно устанавливать произвольные частоты дискретизации в диапазоне от 400 Гц до 326 МГц. Максимальная полоса демодуляции анализатора составляет 120 МГц.

Альтернатива использованию ВЧ-входа — это прямая оцифровка аналоговых модулирующих сигналов. Кроме того, для анализа цифровых модулирующих сигналов (без необходимости использования их аналоговых составляющих) предоставляется цифровой IQ-интерфейс. Внутренняя память анализатора сигналов может хранить до 705 млн отсчетов IQ-данных, что позволяет, например, записывать сигналы стандарта 802.11a длительностью более 35 с.

Наконец, захваченные IQ-данные передаются внешнему ПК, на котором функционирует программное обеспечение для OFDM-измерений.

Параметризация OFDM

Для правильного конфигурирования алгоритмов демодулятора в анализаторе необходимо знать структуру OFDM-системы. В то время как основные параметры OFDM-модуляции (длина БПФ и длина циклического префикса) могут быть установлены вручную из графического интерфейса пользователя,

непосредственный ввод позиций пилот-сигналов или данных о сигнальных созвездиях может быть достаточно сложным. Вместо этой информация хранится в отдельном конфигурационном файле, который может быть создан внешним приложением — мастером или с помощью высокоуровневого языка программирования.

Параметры OFDM-системы при описании во временной и частотной областях различаются. Во временной области основной единицей описания OFDM-системы является отсчет. Формат одного символа OFDM из N_s отсчетов описывается длинами БПФ-интервала N_{FFT} и защитного интервала N_g (рис. 1). Частота дискретизации f_s должна соответствовать такту БПФ, то есть $f_s = N_{FFT} \times (\text{разнос поднесущих})$. Для обеспечения синхронизации и частотной коррекции канала необходимо, чтобы защитный интервал был равен циклическому префиксу, который представляет собой копию конечной части БПФ-интервала.

В частотной области основной единицей является ячейка, обращение к которой ведется по символьному номеру l и номеру несущей k . Частотно-временная матрица, сформированная из всех ячеек, называется кадром. Наиболее важная частотно-временная матрица — структурная матрица — показана на рис. 2, здесь каждая ячейка относится к одному из следующих типов: пилотная, данных, нулевая или «безразличная».

Пилотные ячейки содержат произвольные и известные комплексные числа, которые хра-

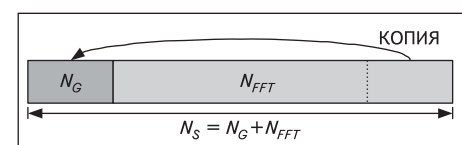


Рис. 1. Определение символа OFDM во временной области

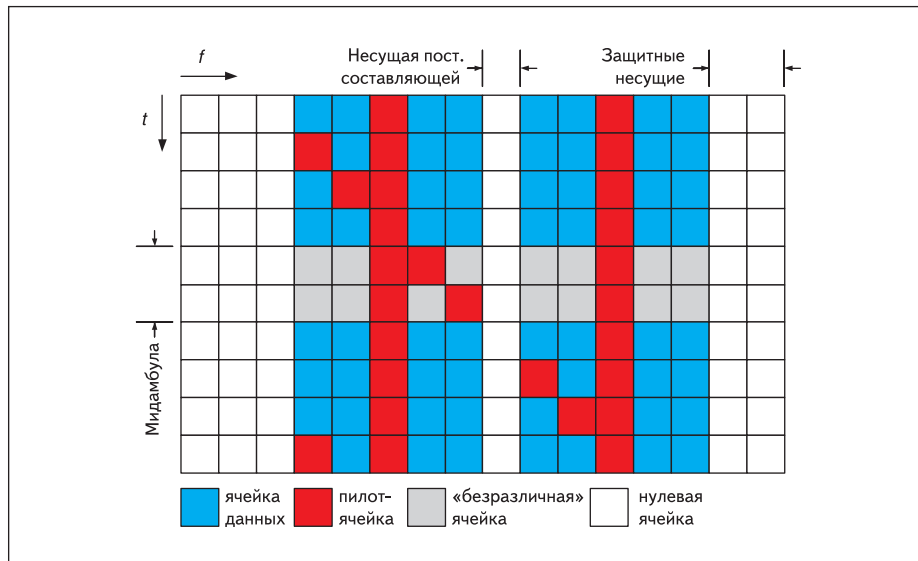


Рис. 2. Структурная матрица с «безразличной» мидамбулой (обучающей последовательностью)

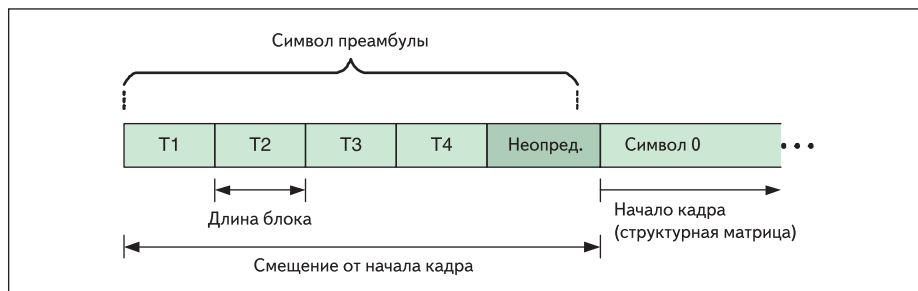


Рис. 3. Определение символа повторяющейся преамбулы

няются в конфигурационном файле в виде разреженной матрицы. Каждая из ячеек данных может указывать на один вектор сигнального созвездия, который содержит все комплексные числа, относящиеся к одному типу модуляции (например, $\{-1, +1\}$ для BPSK-модуляции). Поскольку количество векторов созвездий не ограничено, а модуляция каждой из ячеек данных устанавливается индивидуально, то такая конфигурация хорошо описывается OFDMA-системами с переменным типом модуляции данных. Если группа ячеек данных указывает на пустой вектор созвездия, то анализатор автоматически определяет тип модуляции этой группы, используя в качестве гипотез все имеющиеся векторы созвездий. Ячейки, которые, как ожидается, не содержат какого-либо значения, определяются как нулевые. Обычно они соответствуют защитным несущим на краю спектра или занятым несущим постоянной составляющей. Оставшийся тип «безразличных» ячеек может быть использован для исключения отдельных областей сигнала из дальнейшей обработки. Такие ячейки могут содержать значения, но они не будут учитываться в алгоритмах оценивания и измерения.

Конфигурационный файл может содержать дополнительное описание повторяющейся преамбулы (рис. 3), часто используе-

мой в таких стандартах беспроводной связи, как WLAN или WiMAX. Преамбула такого вида состоит из двух или более блоков с одинаковым содержимым и может использоваться для временной синхронизации внутри анализатора. Для обеспечения такой синхронизации должны быть заданы значения длины блока и смещения от начала кадра, при этом фактическое содержание блока преамбулы для анализатора не важно.

Обычно задавать различные конфигурационные матрицы вручную нерационально. Поэтому реализована поддержка Matlab-класса с базовыми методами для управления конфигурацией. В нескольких примерах программ показано использование данного Matlab-класса для создания соответствующих конфигурационных файлов. Дополнительный инструмент позволяет генерировать тестовые сигналы в виде IQ-данных из ранее заданного конфигурационного файла.

Обработка сигналов

На рис. 4 показан тракт обработки сигнала в измерительном демодуляторе. В нем можно выделить блок синхронизации (для синхронизации по времени и частоте), блок оценки параметров с помощью пилот-сигналов (он возвращает опорный сигнал после

распознавания данных), блок оценки параметров с помощью данных (для уточнения результатов оценки) и, наконец, блок измерений. Конструкция приемника приблизительно соответствует описанию в [3, 4].

Синхронизация начинается с обнаружения пакета импульсов, при котором, исходя из порога по мощности, из импульсного сигнала извлекаются области передачи. Для непрерывной передачи, как в большинстве систем вещания, имеется возможность пропустить этот блок. На следующем этапе (синхронизации по времени) для нахождения оптимальной точки начала БПФ используется либо преамбула, либо циклический префикс каждого из OFDM-символов. Эта процедура основывается на нормированном корреляционном показателе, определенном в [5]. Если выбрана синхронизация с помощью преамбулы, то определяется корреляция между последовательными блоками в структуре повторяющейся преамбулы. В случае синхронизации с помощью циклического префикса ищется корреляция защитного интервала каждого символа с конечной частью БПФ-интервала. Оба метода дополнительно возвращают оценку дробного смещения частоты за счет оценивания фазы максимума корреляции. Найденное смещение частоты должно быть скомпенсировано перед выполнением БПФ для исключения взаимных помех между несущими.

По умолчанию начальная точка БПФ помещается в центре защитного интервала (импульсная характеристика считается симметричной), но при необходимости она может сдвигаться в пределах защитного интервала. После выполнения БПФ для каждого имеющегося OFDM-символа становится доступна частотно-временная матрица $R_{l,k}$ с индексом символа l и индексом поднесущей k . Следующий этап (кадровой синхронизации) определяет начало кадра в пределах данной матрицы и целочисленное смещение частоты несущей. Данная процедура выполняется путем двумерной корреляции матрицы $R_{l,k}$ с известной пилотной матрицей из конфигурационного файла. Во избежание ненужных вычислений для сигналов с малым смещением частоты интервал поиска в частотном направлении может быть ограничен управляющим параметром.

Блок оценки по пилот-сигналам в тракте обработки сигнала использует предварительно заданные пилотные ячейки для оценки параметров и последующей компенсации искажений сигнала. На первом этапе производится оценка максимального правдоподобия оставшегося отклонения частоты и сдвига тактовой частоты. Отклонение частоты приводит к смещению фазы, линейно возрастающему со временем, а сдвиг тактовой частоты вносит дополнительное отклонение фазы, линейно возрастающее с частотой. Модуль оценки определяет наиболее вероятные параметры, приводящие к смещениям

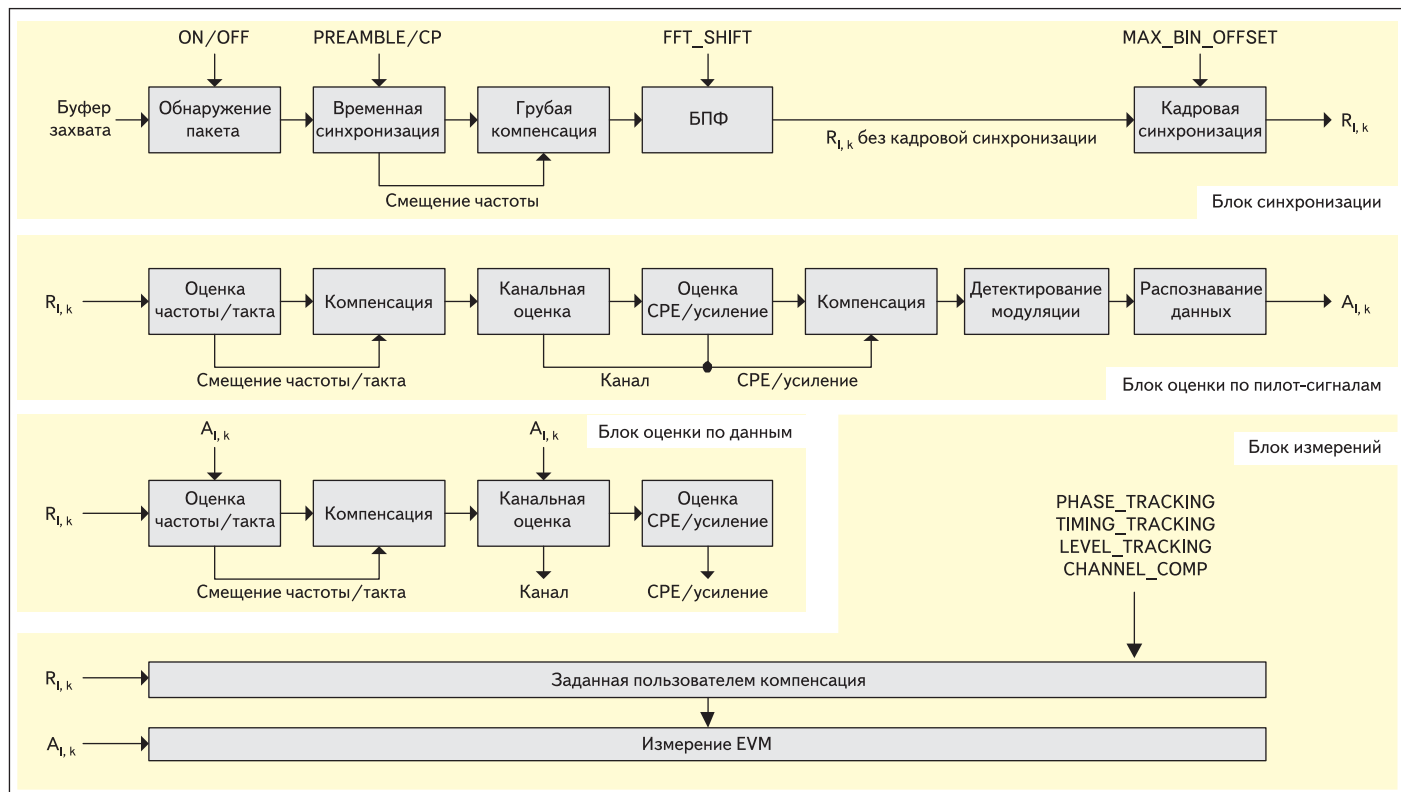


Рис. 4. Тракт обработки сигнала в OFDM-демодуляторе

фазы, наблюдаемым на пилотных ячейках. Результирующие значения смещения компенсируются в частотной области путем повторного поворота фазы матрицы $R_{l,k}$. Однако для сильных смещений тактовой частоты может потребоваться передискретизация принятого сигнала во временной области и повторение этапа БПФ.

Следующий модуль (канальной оценки) определяет передаточную функцию канала на известных позициях пилот-сигналов и использует интерполяцию для получения вектора полной частотной характеристики для всех поднесущих. Так как имеющаяся измерительная система предназначена для стационарных каналов, то интерполяция выполняется только в частотном направлении. Узловые значения на частотной оси определяются путем усреднения по времени всех имеющихся пилот-сигналов каждой поднесущей. В зависимости от расположения пилот-сигналов на частотной оси заранее рассчитывается интерполирующий банк фильтров с коэффициентами оптимального фильтра Винера. Фильтр Винера рассчитывается на основе того предположения, что максимальная длина импульсной характеристики не превышает длины циклического префикса.

Хотя и предполагается, что канал является стационарным, общее отклонение фазы и вариации уровня мощности оцениваются по-символьно по всему кадру. При этом учитываются эффекты установления генераторов и усилителей мощности. Все вычисленные

искажения полностью компенсируются с целью получения оптимального сигнала для следующей стадии детектирования модуляции и распознавания данных.

Блок детектирования модуляции определяет тип модуляции ячеек данных. Каждой несущей или каждому символу может быть поставлено в соответствие одно сигнальное созвездие. В противном случае определяется информация о модуляции, содержащаяся в конфигурационном файле, для извлечения групп ячеек данных с согласованной модуляцией. Функция оценки использует метод максимального правдоподобия, в котором каждая группа ячеек данных сравнивается со всеми возможными гипотезами модуляции и для последующего распознавания данных используется наиболее вероятное сигнальное созвездие для каждой группы. В конечном счете, блок распознавания данных выводит опорную сигнальную матрицу $A_{l,k}$, являющуюся оптимальной оценкой реально переданного OFDM-кадра.

Следующую часть демодулятора включают при необходимости уточнения оценки параметров с помощью опорного сигнала. В то время как предыдущие стадии демодуляции в алгоритмах оценивания могли использовать только пилотные ячейки, блок оценки по данным может учитывать ячейки данных как дополнительные пилот-сигналы. Тем самым увеличивается точность оценок при хорошем отношении сигнал/шум в отсутствие ошибок распознавания данных. Однако если опорная сигнальная матрица $A_{l,k}$

содержит ошибочно распознанные ячейки данных, то блок оценки по данным может исказить результаты измерения, и его следует исключить из тракта обработки.

Оставшаяся часть тракта обработки сигнала содержит блоки пользовательской компенсации и измерения качества модуляции. В блок измерения для расчета модуля вектора ошибок EVM поступают принятые OFDM-символы $R_{l,k}$ и предварительно определенные опорные OFDM-символы $A_{l,k}$. Принятые OFDM-символы могут быть дополнительно скомпенсированы с помощью девиаций фазы, времени и уровня, а также передаточной функции канала.

Результаты измерений

Результаты измерений делятся на 5 групп:

- мощность сигнала;
- модуль вектора ошибок;
- передаточная функция канала;
- сигнальное созвездие;
- скалярные значения искажений.

Результаты измерений мощности сигнала доступны без какого-либо знания пилот-сигналов или типов модуляции, и поэтому конфигурационный файл для них не требуется. Мощность в дБм может отображаться напротив символа и несущей и тем самым представляет удобный инструмент для проверки правильности конфигурации аппаратного обеспечения анализатора и частотно-временного распределения сигнала. Статистический анализ мощности сигнала можно проводить

с помощью измерения дополнительной интегральной функции распределения CCDF.

Модуль вектора ошибок EVM — это широко используемый параметр для оценки качества модуляции сигнала. Для ячейки в кадре OFDM параметр EVM [дБ] определяется как:

$$EVM_{l,k} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{|r_{l,k} - a_{l,k}|^2}{\frac{1}{N_{used}} \sum_{l,k} |a_{l,k}|^2} \right),$$

где $r_{l,k}$ — позиция принятого символа на комплексной плоскости с номером символа l и номером несущей k . Позиция принятого символа компенсируется отклонениями фазы и тактовой частоты, а также передаточной функцией канала в соответствии с пользовательскими настройками; $a_{l,k}$ — позиция опорного символа на комплексной плоскости с номером символа l и номером несущей k ; N_{used} — количество использованных ячеек, то есть всех ячеек с $a_{l,k} \neq 0$.

Наблюдение за EVM в направлениях по символам и несущим дает представление о происхождении получаемых результатов оценки качества модуляции. На рис. 5 показан пример возрастания EVM из-за смещения тактовой частоты в сигнале стандарта DVB-T. Отклонения частоты, так же как и отклонения тактовой частоты, приводят к вращению фазы точек сигнального созвездия. Для небольших углов отклонения конечное значение EVM может быть приблизительно описано следующим уравнением:

$$EVM_{l,k} [\text{дБ}] \approx \approx 20 \times \log_{10} \left(2 \pi \frac{N_s}{N_{FFT}} \left(\xi \times k + \Delta f \times \frac{N_{FFT}}{f_s} \right) \times l \right)$$

с относительным отклонением тактовой частоты и отклонением частоты Δf в Гц.

Результаты канальных измерений дают оценку передаточной функции канала. Кривые неравномерности канала и групповой задержки отображают модуль и фазу девиаций по поднесущим. Обратное БПФ от передаточной функции канала возвращает кривую импульсной характеристики. Импульсная характеристика отображается вместе с пределами защитного интервала, так что имеется возможность установления факта утечки в полезную часть БПФ, вызывающего межсимвольную интерференцию.

Содержимое OFDM-ячеек может быть отображено на комплексной плоскости в виде диаграммы сигнального созвездия. При этом есть возможность выбора конкретных частей сигнала, например, только пилот-сигналов или только данных, или ограничения измерения отдельными символами или поднесущими для быстрого нахождения выбросов.

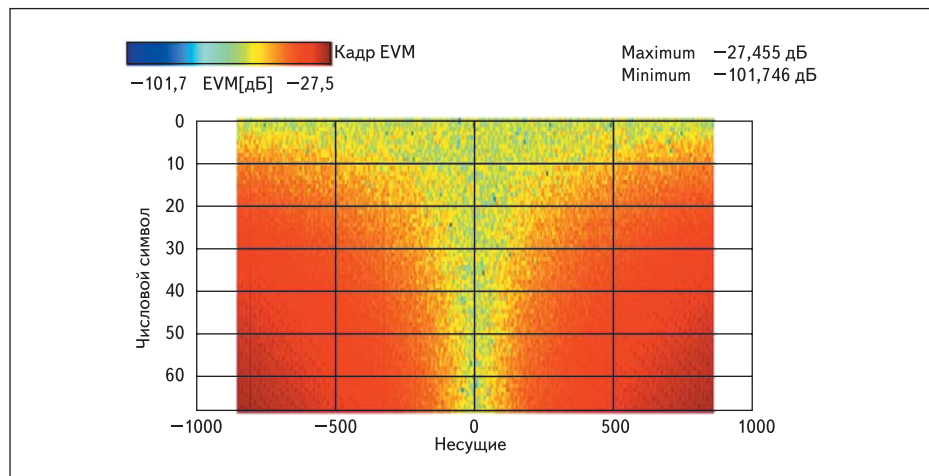


Рис. 5. Влияние некомпенсированного смещения такта на EVM в плоскости символ/несущая кадра DVB-T (2k)

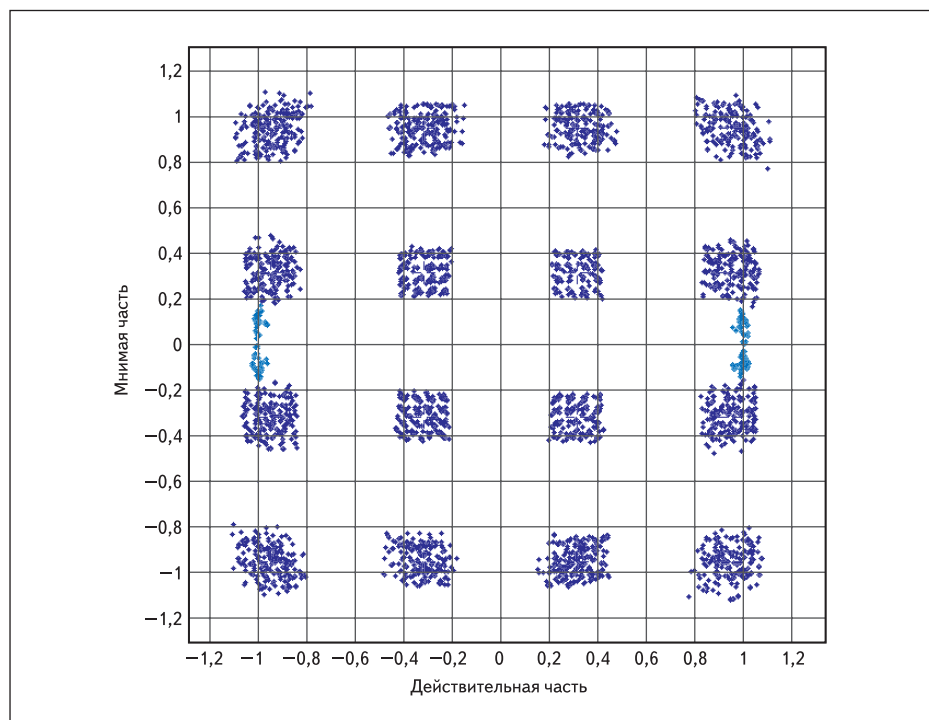


Рис. 6. Влияние квадратурной ошибки IQ на сигнальное созвездие 16-QAM с пилот-сигналами BPSK

Результаты скалярных измерений представлены в таблице минимальными, средними и максимальными статистическими значениями по всем захваченным кадрам. Таблица содержит следующие значения:

- усредненное значение EVM;
- смещение IQ, дисбаланс IQ, квадратурная ошибка IQ;
- отклонение частоты, отклонение тактовой частоты;
- мощность кадра, пикфактор.

Хотя дисбаланс и квадратурная ошибка IQ в системах с одной несущей приводят к характеристическим искажениям осей созвездия, их влияние на OFDM-созвездия сложнее. В модели передатчика модулирующего сигнала для IQ-искажений комплексный множитель $(1 + \Delta Q)$ определяет коэффициент уси-

ления и угол между мнимой и реальной частями сигнала:

$$S_{dist}(t) = \Re\{s(t)\} + j \times (1 + \Delta Q) \times \Im\{s(t)\}.$$

В частотной области на стороне приемника это приводит к взаимной интерференции несущих, симметричных относительно несущей постоянной составляющей, то есть:

$$r_{l,k} = a_{l,k} + \frac{\Delta Q}{2} \times (a_{l,k} - a_{l,-k}).$$

Диаграмма сигнального созвездия (рис. 6) получена в результате воздействия 10-кватратурной ошибки IQ на WiMAX-сигнал с модуляцией 16-QAM. Хорошо просматривается взаимное наложение созвездий.

Заключение

В данной статье в общих чертах описано решение для OFDM-измерений в анализаторе сигналов. Конфигурация измерительного программного обеспечения может быть адаптирована к большому количеству систем OFDM и OFDMA. Это решение успешно применялось на практике к многочисленным стандартам беспроводной связи и вещания, включая стандарты WLAN 802.11a, WiMAX 802.16, DVB-T и ISDB-T. Более того, оно успешно использовалось для анализа оригинальных систем OFDM, например, в оборудовании авиакосмического и оборонного назначения.

Модульные блоки обработки сигнала и использование конфигурационного файла позволяют легко наращивать функциональность для удовлетворения будущих требований. При совместном использовании с анализатором сигналов высшего класса данное решение предоставляет достоверную информацию для разработки и обслуживания систем OFDM. ■

Литература

1. Rohde & Schwarz. R&S FSQ-K96 OFDM Vector Signal Analysis with the R&S FSQ Signal Analyzer. Product Brochure, V. 1.00, March 2008.
2. Rohde & Schwarz. R&S FSQ Signal Analyzer. Product Brochure, V. 3.00, January 2007.
3. Speth M., Fechtel S. A., Fock G., Meyr H. Optimum receiver design for wireless broad-band systems using OFDM. Part I. IEEE Trans. on Comm., Vol. 47. 1999.
4. Speth M., Fechtel S. A., Fock G., Meyr H. Optimum receiver design for wireless broad-band systems using OFDM. Part II: A case study. IEEE Trans. on Comm., Vol. 49. 2001.
5. Schmidl T. M., Cox D. C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM. IEEE Trans. on Comm., Vol. 45. 1997.