

FDMA С ОДНОЙ НЕСУЩЕЙ — НОВЫЙ ВОСХОДЯЩИЙ КАНАЛ LTE

ЯНИНА ВИТАКРЕ, технический специалист, Agilent Technologies

В статье рассматриваются характеристики физического уровня (уровня 1) восходящего канала LTE, описываются новая схема передачи SC-FDMA (множественного доступа с частотным разделением каналов и одной несущей) и некоторые связанные с ней измерения. Понимание этой новой схемы передачи и измерений является важным шагом на пути к разработке абонентских устройств LTE и продвижению их на рынок.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире активно развивается третье поколение беспроводных коммуникационных систем на основе W-CDMA (широкополосного множественного доступа с кодовым разделением каналов). Для обеспечения конкурентоспособности этих систем в конце 2004 г. 3GPP (Партнерский проект 3-го поколения) инициировал создание проекта долгосрочного развития (LTE) сотовой технологии 3GPP.

Технические характеристики LTE определены в «Выпуске 8» стандарта 3GPP. Учитывая, что развертывание первых систем предполагается начать к 2010 г., LTE создает надежную основу для развития сетей 3-го поколения и нацелен на решение следующих задач:

- повышенная пиковая скорость передачи данных в сторону базовой станции до 86,4 Мбит/с в полосе 20 МГц с применением модуляции 64QAM (квадратурная амплитудная модуляция);
- повышенная пиковая скорость передачи данных в сторону абонента до 172,8 Мбит/с в полосе 20 МГц с применением модуляции 64QAM и схемы 2x2 SU-MIMO (однопользовательская система с несколькими входами/выходами);
- максимальная пиковая скорость передачи данных в сторону абонента до 326,4 Мбит/с с применением системы 4x4 SU-MIMO;
- гибкое использование спектра с изменяемой шириной восходящего и нисходящего каналов в диапазоне 1,4...20 МГц;
- повышенная эффективность использования спектра с выигрышем в 2—4 раза по сравнению с «Версией 6» HSPA (высокоскоростного пакетного доступа);
- задержки менее 5 мс для небольших IP-пакетов;
- оптимизированный прием для мобильных устройств, движущихся с небольшими скоростями 0...15 км/ч; более высокие скорости до 120 км/ч будут поддерживаться высокопроизводительными системами, способными

работать на предельных скоростях до 350 км/ч;

– сосуществование со старыми системами с одновременным развитием в сторону сетей, полностью работающих на основе IP-протокола.

РАДИОИНТЕРФЕЙС LTE

В системах LTE используются два основных метода дуплексной связи: дуплекс с частотным разделением (FDD) и дуплекс с временным разделением (TDD). Применяются и другие варианты, в т.ч. FDD с половинной скоростью. При этом интеграция режимов FDD и TDD в LTE значительно ближе, чем это было в UMTS. Схема передачи в сторону абонента использует множественный доступ с ортогональным делением частот (OFDM), а для передачи в сторону базовой станции применяется новая схема передачи, получившая название SC-FDMA. Эта новая схема объединила черты как традиционной схемы с одной несущей, так и схемы OFDM.

OFDM И OFDMA

Технология OFDM известна с середины 1960-х гг. и в настоящее время применяется во многих беспроводных системах, не относящихся к сотовой связи, таких как цифровое телевидение (DVB), цифровое радиовещание (DAB), асимметричная цифровая абонентская линия (ADSL) и некоторые разновидности стандартов Wi-Fi 802.11. Применение OFDM в беспроводной мобильной связи сдерживалось по двум основным причинам. Первая заключается в том, что для выполнения необходимых быстрых преобразований Фурье (FFT) требуется достаточно большая вычислительная мощность. Однако непрерывное развитие технологий обработки сигнала привело к тому, что эту причину уже нельзя считать препятствием на пути внедрения OFDM, и теперь эта технология образует основу нисходящего канала LTE. Другим фактором, сдерживающим применение OFDM в мобильных системах, были присутствующие этой технологии сигналы с высоким отношением пикового значения к

среднему (PAR), которые порождаются параллельной передачей нескольких сотен близко расположенных поднесущих. Для мобильных устройств сигналы с большим PAR создают целый ряд проблем, связанных с конструкцией усилителя мощности и потреблением энергии от батарей. Именно поэтому 3GPP остановился на новой схеме передачи SC-FDMA.

Множественный доступ в нисходящем канале LTE достигается за счет применения тщательно доработанной версии OFDM, получившей название множественного доступа с ортогональным разделением частот (OFDMA). Данный метод позволяет закреплять отдельные поднесущие за разными пользователями. Это облегчает обслуживание многих абонентов, работающих с низкими скоростями, а также позволяет использовать частотные скачки для смягчения эффектов узкополосного многолучевого распространения.

SC-FDMA

SC-FDMA представляет собой гибридную схему передачи, которая сочетает низкие значения PAR, присущие системам с одной несущей, таким как GSM и CDMA, с большой длительностью символа и гибким распределением частот OFDM. Принципы генерации сигнала SC-FDMA показаны на рисунке 1, который является фрагментом одного из рисунков отчета 3GPP TR 25.814 об исследовании физического уровня LTE.

В левой части рисунка 1 символы данных представлены во временной области. Символы преобразуются в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье и затем, в частотной области, они распределяются в нужные места общего спектра несущей. Затем их требуется снова преобразовать во временную область, чтобы перед передачей добавить к ним циклический префикс. Альтернативное название технологии SC-FDMA — распределенная OFDM с дискретным преобразованием Фурье (DFT-SOFDM).

ВАША РЕКЛАМА на информационном портале ВРЕМЯ ЭЛЕКТРОНИКИ



www.russianelectronics.ru

Для поставщиков электронных компонентов и встраиваемых систем
Контрактных производителей
Поставщиков измерительного оборудования
Поставщиков технологического оборудования и материалов



ПОСЕТИТЕЛИ — КЛЮЧЕВЫЕ ПЕРСОНЫ РЫНКА



ИСЧЕРПЫВАЮЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОБ АУДИТОРИИ ПОРТАЛА

- число уникальных посетителей в день/неделю/месяц
- доля постоянных (лояльных) посетителей
- число просмотренных страниц и время на сайте
- отраслевой и должностной профиль подписчиков ленты новостей
- посещаемость различных разделов и страниц сайта
- география посетителей



ОПЛАТА РЕЗУЛЬТАТА, А НЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЕГО ПОЛУЧИТЬ

- 5 руб. за внимание (за показ предложения (баннера) посетителю сайта)
- 20 руб. за интерес (за переход заинтересованного посетителя на сайт рекламодателя)
- от 300 руб. за запрос (за заполнение запроса или анкеты потребителем)



РЕЗУЛЬТАТЫ ВИДНЫ СРАЗУ!!!

- Статистика Вашего сайта
- Запросы потребителей
- Рост продаж



МИНИМАЛЬНАЯ РЕКЛАМНАЯ КАМПАНИЯ – 10 000 РУБ.

Расценки: www.elcp.ru/innet.html

Запросы направляйте по адресу: adv@ecompr.ru,

тел.: (495) 741-77-01, доб. 2243, факс: (495) 741-77-02, Антон Денисов



Рис. 1. Генерация сигнала SC-FDMA

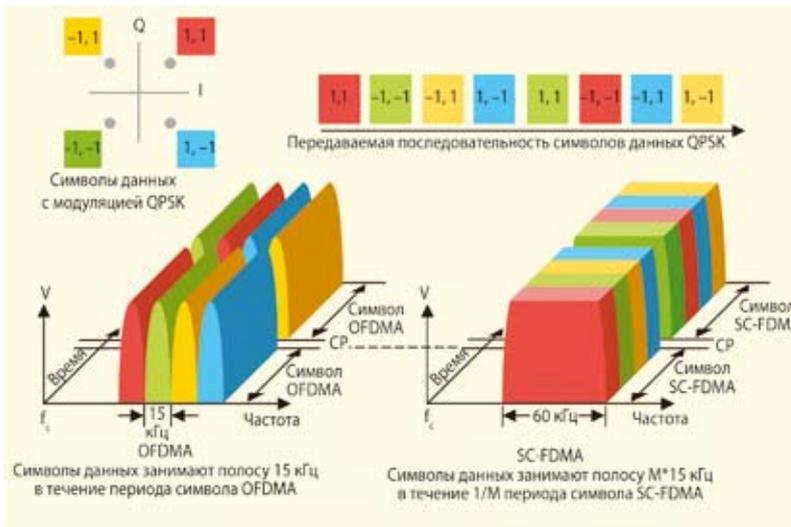


Рис. 2. Сравнение передачи серии символов данных QPSK в OFDMA и SC-FDMA

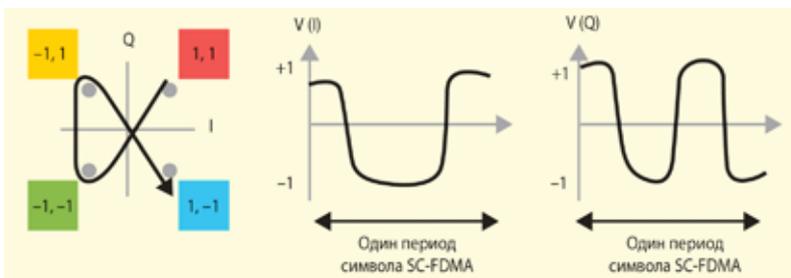


Рис. 3. Создание символа SC-FDMA во временной области

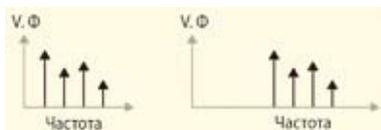


Рис. 4. Представление символа SC-FDMA в полосе модулирующего сигнала и со сдвигом по частоте

Альтернативное описание этой технологии приведено на рисунке 2, где в частотной и временной областях показано, как OFDMA и SC-FDMA передают последовательность из восьми символов QPSK. В этом упрощенном примере число поднесущих (M) было сокращено до четырех. Для OFDMA четыре (M) символа обрабатываются параллельно, причем каждый из них модулируется собственной поднесущей с соответствующей фазой QPSK. Каждый символ

данных занимает полосу 15 кГц на время передачи одного символа OFDMA, которое равно 66,7 мкс. В начале следующего символа OFDMA вставляется защитный интервал, содержащий циклический префикс (CP). CP представляет собой копию конца символа, добавленную к началу символа. Благодаря параллельной передаче, символы данных имеют ту же длину, что и символы OFDMA.

В случае SC-FDMA символы данных передаются последовательно. Поскольку в данном примере используются четыре поднесущих, за один период символа SC-FDMA передаются четыре символа данных. Период символа SC-FDMA имеет ту же длину, что и символ OFDMA, т.е. 66,7 мкс, но благодаря последовательной передаче символы данных получаются короче, т.е. равными 66,7/ M мкс. В связи с повышением скорости следования сим-

волов для их передачи требуется более широкая полоса. В результате каждый символ занимает в спектре 60 кГц, а не 15 кГц, как было в случае более медленных символов, используемых в OFDMA. После передачи четырех символов данных вставляется CP.

В продолжение графического сравнения OFDMA и SC-FDMA на рисунках 3 и 4 показан детальный процесс генерации сигнала SC-FDMA. Сначала создается представление последовательности символа данных во временной области, как показано на рисунке 3. В данном примере с четырьмя поднесущими для генерации одного символа SC-FDMA требуются четыре символа данных. Используя первые четыре цветных символа QPSK (см. рис. 2), процесс создает один символ SC-FDMA во временной области, рассчитывая траекторию, переходящую от одного символа данных QPSK к другому. Это делается со скоростью в M раз выше скорости символов SC-FDMA, так что в результате один символ SC-FDMA содержит M последовательных символов данных QPSK. Чтобы не усложнять рассмотрение, мы не будем обсуждать фильтрацию переходов между символами, хотя в любой реальной схеме такая фильтрация обязательно присутствует.

После создания IQ-представления одного символа SC-FDMA во временной области следующим шагом является представление его в частотной области с помощью дискретного преобразования Фурье (DFT; см. рис. 4). Частота дискретизации DFT выбирается таким образом, чтобы форма одного символа SC-FDMA во временной области полностью представлялась M бинами DFT, отстоящими друг от друга на 15 кГц, причем каждый бин представляет одну поднесущую с постоянной амплитудой и фазой в течение одного периода символа SC-FDMA равного 66,7 мкс. При этом всегда существует однозначное соответствие между числом символов данных, передаваемых за один период символа SC-FDMA, и числом создаваемых бинов DFT, которое, в свою очередь, равно числу занимаемых поднесущих. Это достаточно логично: с ростом числа символов данных, передаваемых за один период SC-FDMA, сигнал во временной области изменяется быстрее, что приводит к расширению полосы и, следовательно, требует большего числа бинов DFT для полного представления сигнала в частотной области.

СТОЙКОСТЬ К МНОГОЛУЧЕВОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ

Теперь самое время задать вопрос: «Как же может SC-FDMA сохранить стойкость к многолучевому распространению при столь коротких символах данных?». В OFDMA модулирующие символы данных остаются постоянными в тече-

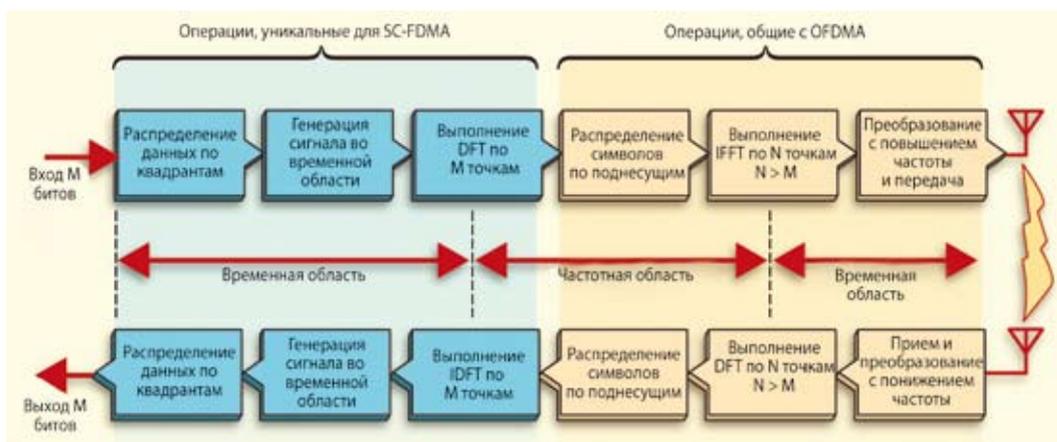


Рис. 5. Упрощенная модель генерации и приема SC-FDMA

ние периода символа OFDMA равно 66,7 мкс, тогда как символ SC-FDMA меняется со временем, поскольку содержит M коротких символов данных. Стойкость к многолучевому распространению процесса демодуляции OFDMA обусловлена большой длиной символов данных, которые накладываются непосредственно на отдельные поднесущие. К счастью, стойкость к разбросу задержки обусловлена именно постоянной природой каждой поднесущей, а не постоянством символов данных. Как показано выше, DFT изменяющегося во времени символа SC-FDMA создает набор бинов DFT, постоянных в течение символа SC-FDMA, несмотря на то, что модулирующие символы данных при этом изменяются. В этом и заключается основное свойство процесса DFT, что изменяющийся во времени символ SC-FDMA, состоящий из M последовательных символов данных, представляется в частотной области M не меняющимися во времени поднесущими. Таким образом, даже SC-FDMA с присущими ему короткими символами данных обладает достаточной стойкостью к многолучевому распространению. На рисунке 2 все поднесущие SC-FDMA показаны с одной и той же амплитудой, но в реальных условиях каждая поднесущая имеет свою амплитуду и фазу в течение каждого символа SC-FDMA.

Теперь для завершения генерации сигнала SC-FDMA выполняются те же операции, что и для OFDMA. Обратное БПФ преобразует смещенный по частоте сигнал во временную область, а затем добавление CP обеспечивает свойственную OFDMA фундаментальную стойкость к многолучевому распространению.

Рисунок 5 иллюстрирует близкую взаимосвязь между SC-FDMA и OFDMA. Оранжевые блоки показывают обработку OFDMA, а синие блоки представляют дополнительную обработку во временной области, необходимую для SC-FDMA. Главное, что следует отметить,

это то, что сигнал, преобразованный из частотной области обратно во временную область, представляет собой ни что иное, как смещенную по частоте версию последовательности символов QPSK. Данный пример демонстрирует основную причину создания SC-FDMA, а именно, PAR конечного сигнала не превышает PAR исходных символов данных, которые в данном случае являются символами QPSK. Это существенно отличается от OFDMA, где параллельная передача тех же символов QPSK создает статистические пики, очень похожие на Гауссовский шум, которые значительно превышают PAR исходных символов данных. Ограничение PAR с помощью SC-FDMA существенно снижает потребность в том, чтобы мобильное устройство работало с высокими пиками мощности. Это снижает и затраты, и энергопотребление.

СТРУКТУРА ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ

Физический уровень LTE состоит из двух типов сигналов, известных как физические сигналы и физические каналы. Физические сигналы генерируются на уровне 1 и используются для синхронизации системы, идентификации ячейки и оценки радиоканала. Физические каналы служат для передачи данных, поступающих с более высоких уров-

ней, включая управление, расписание и полезные данные. В таблице 1 показаны физические сигналы и каналы восходящего соединения.

СТРУКТУРА ФРЕЙМА ВОСХОДЯЩЕГО СОЕДИНЕНИЯ

В восходящем соединении используются две структуры фрейма, одна для FDD типа 1 и другая — для FDD типа 2. Фрейм типа 1 имеет длительность 10 мс и состоит из десяти субфреймов, каждый из которых занимает два слота по 0,5 мс. На рисунке 6 показано распределение DMRS и PUSCH по структуре фрейма. Число символов в слоте зависит от длины CP. Для нормального CP в каждом слоте содержится семь символов SC-FDMA. Для расширенного CP, который используется при большом разбросе задержки, в каждом слоте содержится шесть символов SC-FDMA. Опорные сигналы демодуляции передаются в четвертом символе каждого слота (т.е. в символе с номером 3). PUSCH может передаваться в любом другом слоте.

На рисунке 7 показана структура фрейма 1 в частотной и временной областях. Каждый вертикальный столбик представляет одну поднесущую. Передачи сгруппированы в блоки, называемые блоками ресурсов (RB), которые состоят из 12-ти соседних

Таблица 1. Сигналы и каналы восходящего соединения

Сигналы восходящего соединения	Полное наименование	Назначение
DMRS	Опорный сигнал (демодуляция)	Используется базовой станцией для синхронизации с абонентским оборудованием и для оценки канала восходящего соединения. Связан с PUCCH или PUSCH
SRS	Опорный зондирующий сигнал	Используется для оценки канала при отсутствии PUCCH или PUSCH
Каналы восходящего соединения	Полное наименование	Назначение
PRACH	Физический канал произвольного доступа	Установка соединения
PUCCH	Физический управляющий канал восходящего соединения	Расписание, ACK/NACK
PUSCH	Общий физический канал восходящего соединения	Полезные данные

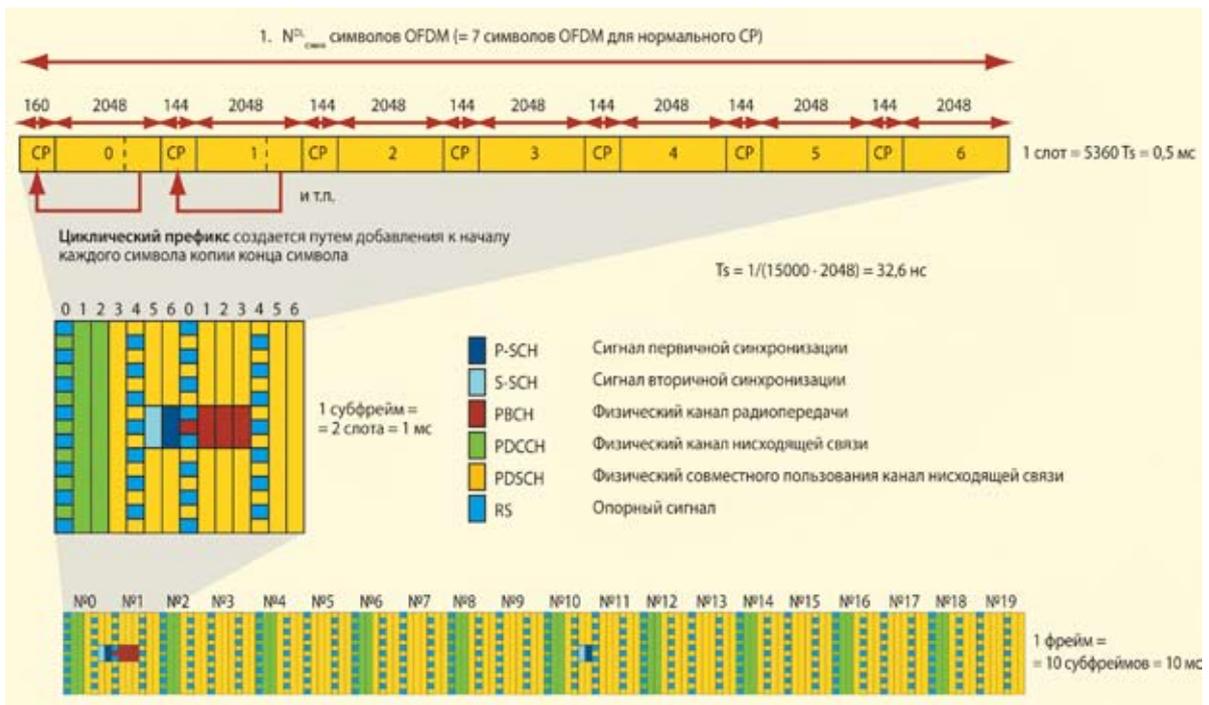


Рис. 6. Структура фрейма 1 для восходящего соединения, показывающая распределение DMRS и PUSCH

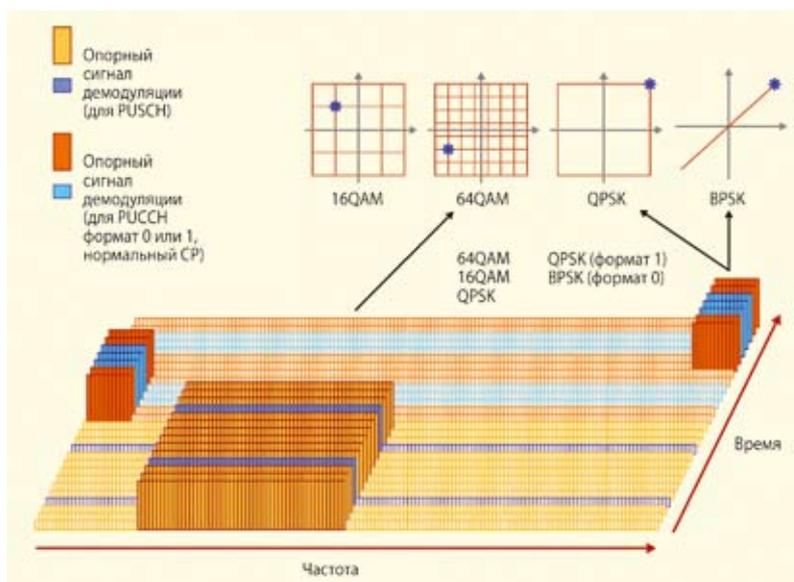


Рис. 7. Структура фрейма 1 для восходящего соединения, показывающая зависимость одного субфрейма от частоты

поднесущих длительностью 0,5 мс. Кроме DMRS и PUSCH на рисунке показан PUSCH, который всегда привязан к крайнему RB в полосе канала, причем в каждом следующем слоте он попеременно привязывается либо к самой нижней частоте, либо к самой верхней. Обратите внимание, что одному абонентскому устройству выделяется диапазон частот, который, как правило, уже полосы системы. Это связано с тем, что число привязанных RB пропорционально скорости передачи, которая не всегда равна максимальному значению. DMRS передается только в полосе, закрепленной за PUSCH и PUSCH, в отличие от опорных сигналов нисходящего соединения, которые всегда

передаются во всей полосе канала, даже если канал занят не полностью.

Если базовой станции нужно оценить состояние восходящего канала при отсутствии передачи управляющих или полезных данных, она выполняет привязку сигнала SRS, который не зависит от PUSCH и PUSCH. PUSCH может применять модуляцию QPSK, 16QAM или 64QAM. PUSCH использует только модуляцию QPSK, а DMRS — BPSK с поворотом на 45°.

АНАЛИЗ СИГНАЛА SC-FDMA

На рисунке 8 показаны некоторые измерения типичного сигнала SC-FDMA, которые можно выполнять с помощью программного обеспечения векторного

анализатора сигналов Agilent 89601A. Сигнальное созвездие IQ в окне A (слева сверху) показывает, что это сигнал 16QAM. Единичный круг представляет собой DMRS, появляющийся с каждым седьмым символом, который модулирован по фазе с помощью ортогональной последовательности Задова-Чу.

Окно B (слева внизу) показывает зависимость мощности сигнала от частоты. Шкала частот выражена в 15-кГц поднесущих, пронумерованных от -600 до 599, которые представляют полосу 18 МГц или 100 RB. Следовательно, номинальная ширина канала составляет 20 МГц, и для передачи сигнала выделено 5 МГц в нижней части спектра. Коричневые точки представляют мгновенную амплитуду поднесущей, а белые точки — усреднение в интервале 10 мс. Выброс в центре окна представляет собой утечку гетеродина — смещение IQ. Большое изображение справа является артефактом OFDM, намеренно созданным с помощью разбаланса усиления IQ на 0,5 дБ. Утечка гетеродина и мощность нераспределенных поднесущих ограничиваются спецификациями 3GPP.

Окно C (вверху в центре) показывает сводку измеренных дефектов, включая амплитуду вектора ошибки (EVM), ошибку по частоте и смещение IQ. Обратите внимание, что EVM данных при 1,15% значительно выше, чем EVM DMRS при 0,114%. Это связано с увеличением мощности данных на +0,1 дБ (что видно в окне E), который в данном примере игнорируется приемником, чтобы создать EVM для конкретных данных. Заметьте также, что зарегистрировано

увеличение мощности DMRS на +1 дБ, которое наблюдается также на сигнальном созвездии IQ, потому что единственный круг не проходит через восемь точек 16QAM. Окно D (внизу в центре) показывает распределение EVM по поднесущим. Среднее и пиковое значение EVM распределенного сигнала соответствует значениям окна С. EVM для нераспределенных поднесущих имеет существенно большее значение, хотя этот дефект будет описан в новых требованиях к «внутриполосным излучениям» как отношение мощностей распределенных RB и нераспределенных RB. Для данного сигнала это отношение равно примерно 30 дБ, как видно в окне В. Синие точки в окне D также показывают EVM для DMRS, значение которой очень мало.

Окно Е (справа сверху) показывает измерения EVM, выполненные для разных типов модуляции в ходе одного захвата. Этот сигнал использует только DMRS с фазовой модуляцией и модуляцией 16QAM, поэтому результаты для QPSK и 64QAM отсутствуют. И, наконец, окно F (справа внизу) показывает PAR — главный параметр SC-FDMA — в виде комплементарной интегральной функции распределения (CCDF). Преимущества параметра PAR для SC-FDMA по сравнению с OFDMA нельзя выразить одним показателем, поскольку

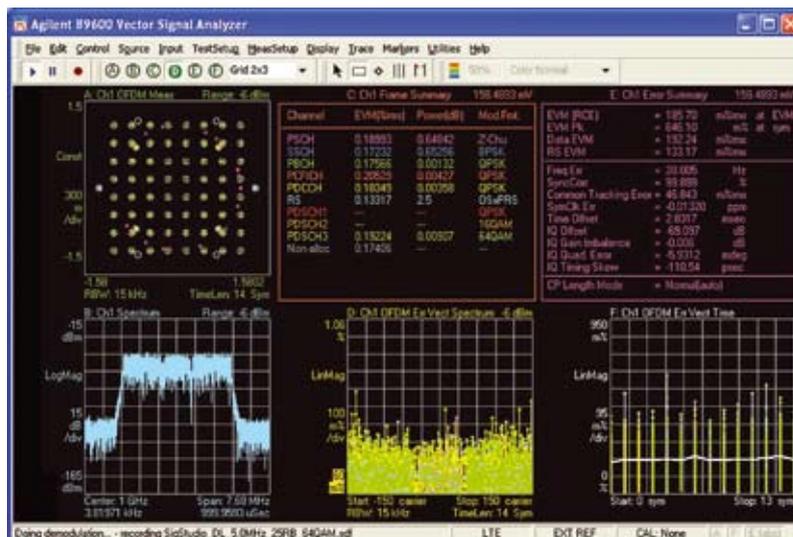


Рис. 8. Анализ сигнала 16QAM SC-FDMA

этот параметр зависит от скорости передачи данных. PAR для OFDMA всегда выше, чем для SC-FDMA даже для узкополосных распределений. Однако с ростом скорости передачи данных и, соответственно, с расширением занимаемой полосы, PAR для SC-FDMA остается постоянным, а для OFDMA ухудшается и приближается к Гауссовскому шуму. Сигнал OFDMA с полосой 5 МГц и модуляцией 16QAM очень похож на Гауссовский шум. По белой кривой видно, что при уровне вероятности

0,01% сигнал SC-FDMA на 3 дБ лучше синей эталонной Гауссовской кривой, а каждому разработчику усилителей хорошо известно, что снижение пиковой мощности даже на 0,1 дБ является значительным улучшением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долговременное развитие радиотехнологии 3GPP/www.3gpp.org/Highlights/LTE/LTE.htm.
2. Спецификации LTE серии 36/www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36-series.htm

ИД «Электроника» предлагает Вам диски с архивами журналов и с материалами конференций, прошедшими в ООО «ИД Электроника»:

1. Архивы журнала «Электронные компоненты»

- 1.1. «Электронные компоненты» 2004-2005 гг. – 250 руб.
- 1.2. «Электронные компоненты» 2006 г. – 250 руб.
- 1.3. «Электронные компоненты» 2007-2008 гг. – 500 руб.

2. Архивы журнала «Производство электроники»

- 2.1. «Производство электроники» 2005-2006 гг. – 300 руб.
- 2.2. «Производство электроники» 2007-2008 гг. – 300 руб.

3. Комплект из 5 дисков с архивами журналов «ЭК» и «ПЭ» – 950 руб.

4. Архивы журнала «Ремонт электронной техники»

- 4.1. «Ремонт электронной техники» 1999-2002 гг. – 150 руб.
- 4.2. «Ремонт электронной техники» 2003-2004 гг. – 50 руб.
- 4.3. «Ремонт электронной техники» 2005-2006 гг. – 150 руб.
- 4.4. «Ремонт электронной техники» 2007-2008 гг. – 300 руб.
- 4.5. Комплект из 4 дисков с архивами журнала «РЭТ» – 600 руб.

5. Материалы конференций

- 5.1. Материалы конференции «Снабжение производства электроники, управление цепочками поставок» (файлы с докладами, презентациями, фотографиями с мероприятий) 2007 г. – 300 руб.

- 5.2. Материалы конференции «Разработка электроники на заказ» (файлы с докладами, презентациями, фотографиями с мероприятий), 2005 г. – 300 руб.
- 5.3. Материалы конференции «Контрактное производство электроники в России» (файлы с докладами, презентациями, фотографиями с мероприятий), 2007 г. – 300 руб.
- 5.4. Форум «Производство электроники в России» (файлы с докладами, презентациями, фотографиями с мероприятий) Диск с аудиосопровождением, 2008 г. – 1000 руб.
- 5.5. Материалы конференции «Встраиваемые системы» (файлы с докладами, презентациями, фотографиями с мероприятий). Диск с аудиосопровождением, 2008 г. – 1000 руб.
- 5.6. Материалы конференции «Силловая электроника» (файлы с докладами, презентациями, фотографиями с мероприятий). Диск с аудиосопровождением, 2008 г. – 1000 руб.
- 5.7. Материалы конференции «Новая электроника России» (файлы с докладами, презентациями, фотографиями с мероприятий) Диск с аудиосопровождением, 2008 г. – 1000 руб.
- 5.8. Комплект из 7 дисков с материалами конференций – 2850 руб.

6. Комплект из всех перечисленных материалов – 5000 руб.

Цены указаны с учетом доставки по почте на территории России.

Заявки на подписку и на приобретение дисков направляйте по адресу: red@ecomp.ru
Тел./факс: (495) 741-7701/741-7702 (отдел распространения)

электроника
инфо медиа группа