

**УДК 621.38**

**Байдилда Ерболат Жанибекович** – магистрант (г. Алматы, Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М.Тынышпаева)

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА LTE**

В таблице 1 представлены основные технические характеристики стандарта LTE.

Таблица 1 - Основные технические характеристики стандарта LTE

Характеристика		Значение
Полоса частот, МГц		1, 4; 3; 5; 10; 15; 20
Метод многостанционного доступа	Нисходящий канал	OFDM
	Восходящий канал	SC-FDMA
Символьная скорость		1400 символов/с
Помехоустойчивое кодирование		сверточные коды, турбо коды
Длительность радиокадра, мс		10
Минимальный интервал между кадрами, мс		1
Стандартный шаг между поднесущими, кГц «вниз»		15
Информационная единица в канале		ресурсный блок
Количество поднесущих на ресурсный блок (занимаемая ресурсным блоком полоса)		12 (180 кГц)
Циклический префикс, мкс	Стандартный	4,7 (5,2-перед первым символом)
	Расширенный	16,7
Дуплексный режим		Частотный (FDD)
		Временной (TDD)
Модуляция сигнала		QPSK/16QAM/64QAM
Максимальная ЭИИМ, дБм	UE	23
	eNodeB	46

Ряд ключевых особенностей делает LTE привлекательной технологией для операторов и пользователей

- использование MIMO и OFDMA/SC-FDMA на радиоинтерфейсе значительно повышает спектральную эффективность и увеличивает скорости передачи данных;
- all-IP-архитектура, оптимизированная под передачу пакетных данных, значительно снижает время отклика сети, что позволяет говорить о развитии click-bang-услуг, а также о динамическом управлении качеством обслуживания (QoS).

При скоростях, которые может обеспечить технология LTE в нисходящем и восходящем каналах (от базовой станции к мобильному устройству и обратно), важно принимать во внимание [1]:

1. Метод дуплексирования каналов;
2. Имеющийся диапазон частот;
3. Вид модуляции поднесущих;
4. Метод помехоустойчивого кодирования данных;
5. Использования технологии MIMO;
6. Затраты ресурсов на управление;
7. Длительность циклических префиксов и пр.

Принципиально новым решением для радиоинтерфейса LTE стало использование новых методов множественного доступа – OFDMA в нисходящем канале (Orthogonal

Frequency Division Multiple Access) и SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) – в восходящем.

Важно, что весь имеющийся спектр разбивается на ортогональные поднесущие по 15 кГц (в нисходящем канале), каждая из которых в свою очередь модулируется определенным видом модуляции (от QPSK до QAM64). Минимальная полоса, выделяемая для одного абонента, содержит 12 поднесущих.

Очевидно, что использование многопозиционных методов модуляции требует каналов с высоким уровнем отношения сигнал/шум. Ухудшение условий радиосвязи приведет к снижению порядка модуляции, а, соответственно, и скорости передачи данных. Помимо порядка модуляции важно принимать во внимание и схему помехоустойчивого кодирования. Например, кодирование со скоростью  $\frac{1}{2}$  в 2 раза снижает скорости передачи данных.

Важнейшей особенностью сетей LTE является масштабируемость занимаемого ими частотного спектра от 1,4 до 20 МГц (возможные полосы - 1,4, 3, 5, 10, 15 и 20 МГц), которая способствует быстрому внедрению технологии в условиях ограниченности радиоресурсов. Чем шире полоса, тем больше будут скорости передачи данных.

Ресурсный блок – это 12 поднесущих в частотной области и один тайм-слот или 7 OFDM-символов во временной области. Поднесущие по краям спектра, как правило, используются в качестве защитных интервалов. В зависимости от законодательных норм, действующих в том или ином географическом регионе, для организации мобильной связи радиоспектр выделяется в разных диапазонах частот парными или непарными полосами разной ширины.

Одной из основных характеристик радиointерфейса LTE, позволяющей задействовать его в разных ситуациях с радиочастотным обеспечением, является гибкость использования радиоспектра. Наряду с возможностью работать в разных диапазонах частот система LTE способна использовать частотные полосы разной ширины: от 1,25 (подходит, например, для начала перехода с систем CDMA 2000 1xEV-DO) до 20 МГц.

Система LTE способна функционировать в парных и непарных частотных полосах, поддерживая частотный (FDD) и временной (TDD) виды дуплекса соответственно. АС может передавать и принимать данные на разных частотах и в разное время, что позволяет значительно понизить требования к характеристикам дуплексного фильтра и способствует уменьшению стоимости терминальных устройств. Появляется возможность задействовать парные частотные полосы с небольшим дуплексным разносом. Решение можно реализовать почти при любом распределении спектра частот.

На рисунке 2 показана передача последовательности QPSK-символов. При этом каждая поднесущая модулируется посредством многократной фазовой модуляции (QPSK - 4-позиционная квадратурная фазовая модуляция и 16-QAM или 64-QAM - квадратурная амплитудная модуляция). Соответственно, один символ на одной поднесущей содержит 2, 4 или 6 бит.

При стандартном префиксе символьная скорость составляет 14000 символов/с, что соответствует, при FDD-дуплексе, агрегатной скорости от 28 до 84 кбит/с на поднесущую. Сигнал с полосой 20 МГц содержит 100 ресурсных блоков или 1200 поднесущих, что дает общую агрегатную скорость в канале от 33,6 до 100,8 Мбит/с. При формировании сигнала амплитуды «лишних» поднесущих (включая центральную поднесущую канала) считаются равными нулю.

В обратном канале LTE используется технология – SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access). Принципиальное ее отличие заключается в том, что если в OFDMA на каждой поднесущей одновременно передается свой модуляционный символ, то в SC-FDMA поднесущие модулируются одновременно и одинаково, но модуляционные символы короче.

То есть в OFDMA символы передаются параллельно, в SC-FDMA – последовательно.

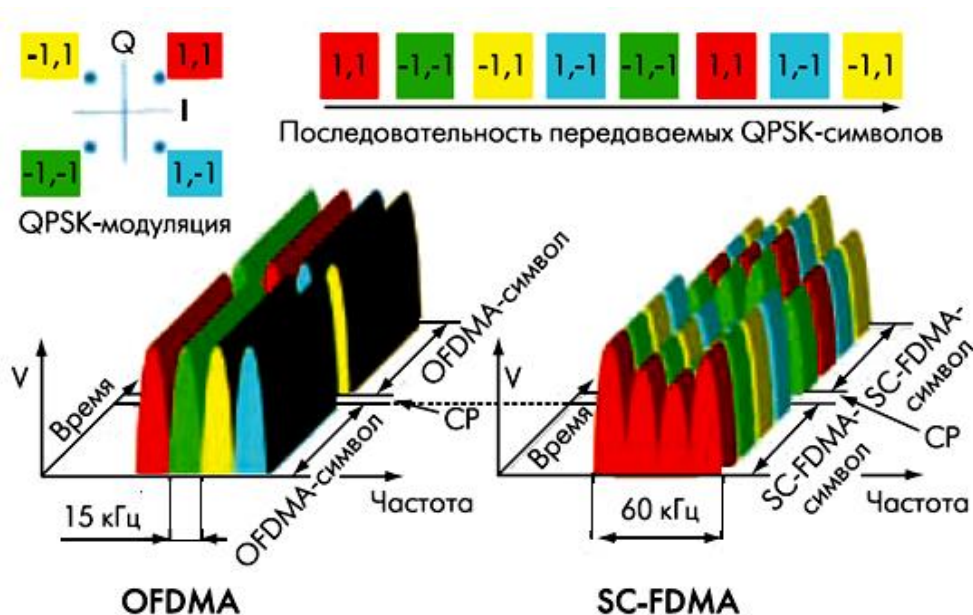


Рисунок 2 - Передача последовательности QPSK-символов

Такое решение обеспечивает меньшее отношение максимального и среднего уровней мощности (пик-фактор) по сравнению с использованием обычной модуляции OFDM, в результате чего повышается энергоэффективность абонентских устройств и упрощается их конструкция (существенно снижаются требования к точности частотных параметров передатчиков).

При этом ресурсная сетка полностью аналогична прямому каналу. Так же каждый физический ресурсный блок, соответствующий слоту, занимает 12 поднесущих с шагом = 15 кГц в частотной области (всего 180 кГц) и 0,5 мс – во временной.

Немаловажным фактором при оценке возможностей LTE является применение технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output). Существуют несколько вариантов применения MIMO – для улучшения покрытия и увеличения абонентской емкости:

- Для увеличения абонентской емкости с разных антенн передается различная информация;
- Для улучшения покрытия с нескольких антенн передается одна и та же информация, что позволяет абонентскому устройству комбинировать сигнал с разных антенн, улучшая его качество.

Информация, передаваемая на радиоинтерфейсе, делится на служебную, которая транслируется по различным каналам управления, и на пользовательские данные. Радиоинтерфейс LTE, поддерживает как частотное, так и временное (FDD и TDD) дуплексирование восходящего и нисходящего каналов, что позволяет разворачивать сети даже при отсутствии спаренных диапазонов. Большинство операторов, запустивших LTE, имеют спаренные полосы частот, поэтому в дальнейшем будем рассматривать FDD.

На рисунке 3 показан случай с коротким циклическим префиксом, занимающим один OFDM-символ и соответственно 7 символов в слоте. Для синхронизации абонентов с сетью в первом субкадре каждого кадра по каналам первичной и вторичной синхронизации (PSS и SSS) передаются специальные последовательности. Они занимают с учетом неиспользуемых ресурсных элементов по краям диапазона 72 OFDM-символа. Ниже описано назначение каналов управления и объем затрачиваемых на них ресурсов:

PSS – Primary Synchronization Channel- идентификатора соты (72 OFDM-символа);  
 SSS – Primary Synchronization Channel- номер группы идентификатора соты (72);  
 PBCH – Physical Broadcast Channel- информация о ширине занимаемой полосы, номер кадра, а также конфигурация (288);

PDCCH – Physical Downlink Control Channel- основной канал служебной информации, по которому передается большая часть системной информации, данные о распределении ресурсов нисходящего и восходящего каналов между абонентами;

RS – Reference Signal-пилот сигнал. При использовании MIMO каждая антенна передает свои пилот-сигналы;

PCFICH – Physical Control Format Indicator Channel- указывает, сколько OFDM-символов занимает PDCCH (12) ;

PHICH – Physical HARQ Indicator Channel-передает информацию HARQ (12) [2].

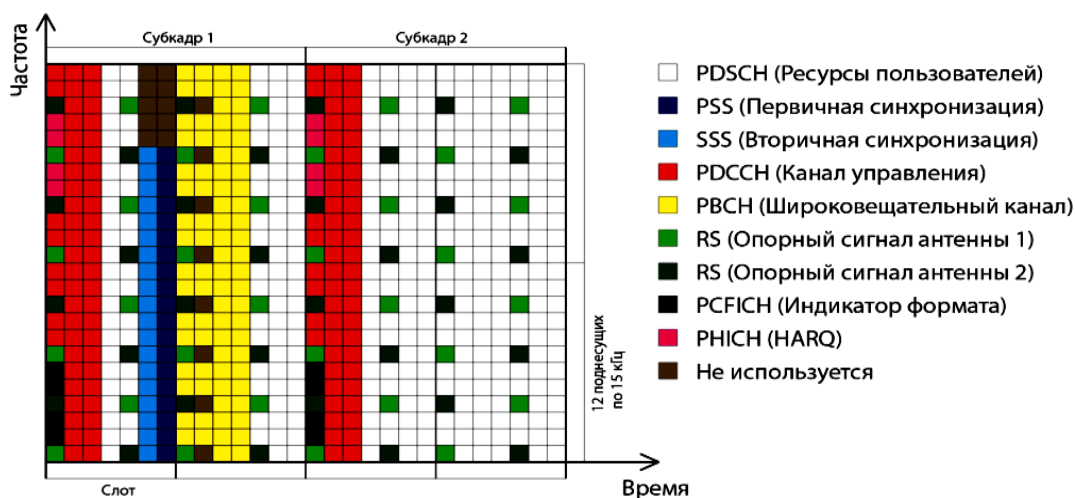


Рисунок 3 - Короткий циклический префикс, занимающий один OFDM-символ и соответственно 7 символов в слоте

В технологии LTE предусмотрена диспетчеризация в восходящем и нисходящем каналах. Под диспетчеризацией понимается процесс распределения сетевых ресурсов между пользователями, передающими данные.

Целью диспетчеризации является сбалансированность качества связи и общей производительности системы. В радиointерфейсе LTE реализована функция динамической диспетчеризации в зависимости от состояния канала связи. Динамическая диспетчеризация обеспечивает передачу данных на повышенных скоростях (за счет использования модуляции более высокого порядка, уменьшения степени кодировки каналов, передачи дополнительных потоков данных, используя параллельную передачу на нескольких РБ, и меньшего числа повторных передач), задействуя для этого временные и частотные ресурсы с относительно хорошими условиями связи.

Таким образом, для передачи информации требуется меньше времени. Частотно-временная сетка OFDM помогает выбирать ресурсы в частотной и временной областях. Для трафика сервисов, пересылающих пакеты с небольшой полезной нагрузкой и через одинаковые промежутки времени, объем трафика сигнализации, необходимой для динамической диспетчеризации, может превышать объем переданной пользователем информации.

В LTE имеется в дополнение к динамической статическая диспетчеризация. Под статической диспетчеризацией понимается выделение пользователю (в нашем случае - на этапе планирования) радиочастотного ресурса для передачи определенного числа подкадров. Механизмы адаптации канала нужны для того, чтобы «выжать все возможное»

из канала с изменяющимся качеством связи. Такой механизм «выбирает» схемы модуляции и канального кодирования в соответствии с условиями связи. От его работы зависят скорость передачи данных и вероятность возникновения ошибок в канале.

Для достижения хорошего качества работы сети при разных условиях эксплуатации реализована адаптивная многопоточная передача, при которой число одновременно пересылаемых потоков данных может постоянно меняться, т.е. постоянно регулируется число РБ, одновременно используемых для передачи данных.

Если состояние канала хорошее, можно одновременно пересылать до четырех потоков данных, используя четыре РБ, достигая тем самым скорости передачи до 300 Мбит/с при ширине занимаемой полосы частот 20 МГц. Для обеспечения требуемой зоны радиопокрытия или высокой скорости передачи данных на границе сот можно передавать один поток данных в узком луче или задействовать разнесенную передачу.

В системе связи время от времени возникают ошибки при пересылке данных — например, из-за шумов, помех и замирания сигнала. Для защиты от ошибок применяются методы повторной передачи искаженных или утраченных частей данных, предназначенные для гарантии качества связи. Для максимально полного использования высокоскоростного радиоинтерфейса в технологии LTE реализована динамическая двухуровневая система повторной передачи с небольшими накладными расходами на обратную связь и повторную посылку данных. Данное решение обеспечивает малую задержку передачи пакетов с небольшими накладными расходами, при этом надежность связи гарантируется. Большинство ошибок обнаруживаются и исправляются на первом уровне. Повторная передача данных на втором уровне (что связано с большими накладными расходами и повышает время задержки передачи пакетов) происходит лишь изредка.

Таким образом, сигналы в восходящем канале LTE являются ортогональными, а значит взаимные радиопомехи между пользователями одной соты при идеальных условиях радиосвязи отсутствуют. Уровень помех, создаваемый пользователями соседних сот, зависит от местоположения излучающих АС и от уровня затухания их сигналов на пути к этим сотам. Это обстоятельство учитывается при построении сот и назначения частот в них для «ближних» и «дальних» абонентов. Чем ближе АС к соседней соте, тем выше уровень создаваемых ей помех в ней. Соответственно АС, находящиеся на более далеком расстоянии от соседней соты, могут передавать сигналы большей мощности, чем АС, расположенные рядом с ней. Ортогональность сигналов в восходящем канале LTE позволяет мультиплексировать сигналы АС разной мощности в этом канале в одной и той же соте.

В действующих сетях мобильной связи важно обеспечить возможность увеличения пропускной способности сети при увеличении количества запросов на передачу трафика посредством управления радиоресурсами сети. Для того, чтобы получить отношение сигнал-шум (С/Ш), достаточный для обеспечения качественной связи необходимо:

- размещать антенны БС на одинаковой высоте, что позволит уменьшить уровень помех. При разных значениях высот велика вероятность, что сигналы БС, использующие более высокое размещение антенн, будут подавлять сигналы более низких;

- направление излучения антенн нужно выбирать таким образом, чтобы максимизировать радиопокрытие сети. Для этого следует направлять антенны так, чтобы их максимальное излучение совпадало с нулями ДН соседних БС и обеспечивало радиопокрытие в нужных районах.

Произведем оценку затрат на управление в стандарте LTE. Допустим, что нам известна скорость передачи в канале «вниз». Для того чтобы оценить реальную скорость передачи информации в канале «вниз» вычисляем, сколько ресурсных элементов передается в миллисекундном кадре в зависимости от имеющейся полосы частот. Если

время распространения невелико (используется короткий циклический префикс), то в одном субкадре на одной поднесущей передается 14 OFDM-символов.

Таким образом, число OFDM-символов в кадре будет равно  $10 \cdot 14 \cdot 12 \cdot \text{NRB}$  (NRB – число ресурсных блоков, 10 – число субкадров в кадре, 12 – число поднесущих в ресурсном блоке). На рисунке 4 представлены затраты на передачу каналов управления.

Для расчета скорости передачи данных, необходимо отбросить служебные символы. Далее следует отбросить еще 1/14 от их количества, занимаемую циклическим префиксом, который не несет в себе полезной информации. Оставшиеся информационные необходимо умножить на количество бит, которые они могут содержать. Число бит в символе будет определяться способом модуляции поднесущих – 2, 4 и 6 бит соответственно для QPSK, QAM16 и QAM64 [3].

Далее необходимо учесть влияние помехоустойчивого кодирования. Как ранее отмечалось, при скорости кодирования, например,  $\frac{1}{2}$  половина от полученного числа бит уйдет на избыточность. Если все это проделать мы найдем реальную скорость передачи информации. Это самые основные особенности, которые необходимо учитывать при оценке скорости.

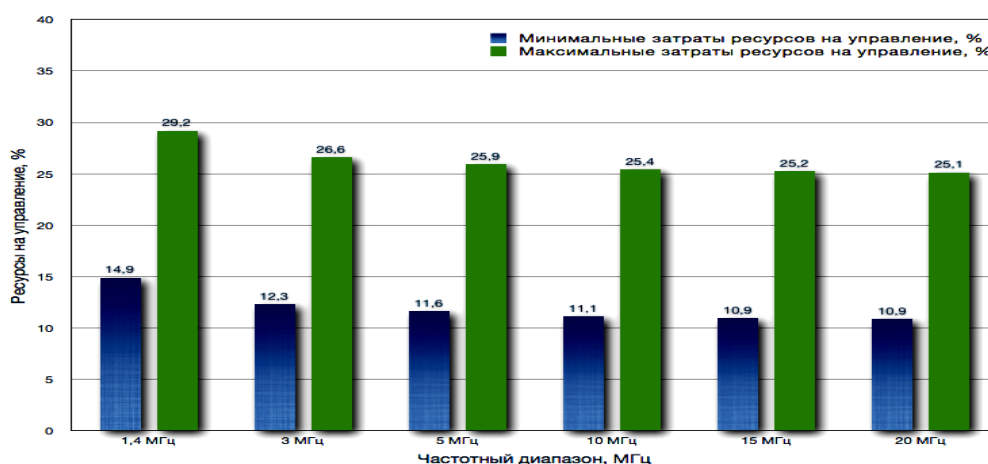


Рисунок 4 - Затраты на передачу каналов управления

**Выводы.** Сигналы в восходящем канале LTE являются ортогональными, а значит взаимные радиопомехи между пользователями одной соты при идеальных условиях радиосвязи отсутствуют. Уровень помех, создаваемый пользователями соседних сот, зависит от местоположения излучающих АС и от уровня затухания их сигналов на пути к этим сотам. Это обстоятельство учитывается при построении сот и назначения частот в них для «ближних» и «дальних» абонентов. Чем ближе АС к соседней соте, тем выше уровень создаваемых ей помех в ней. Соответственно АС, находящиеся на более далеком расстоянии от соседней соты, могут передавать сигналы большей мощности, чем АС, расположенные рядом с ней. Ортогональность сигналов в восходящем канале LTE позволяет мультиплексировать сигналы АС разной мощности в этом канале в одной и той же соте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Product Specification, Fast Fourier Transform v 3.2, Xilinx LogiCORE, DS260 January 11, 2006
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. - Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. - 1104 с.
3. Вишневикий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005, - 592 с.