

# Введение

*Один опыт я ставлю выше, чем тысячу мнений, рожденных только воображением.*  
М.В. Ломоносов

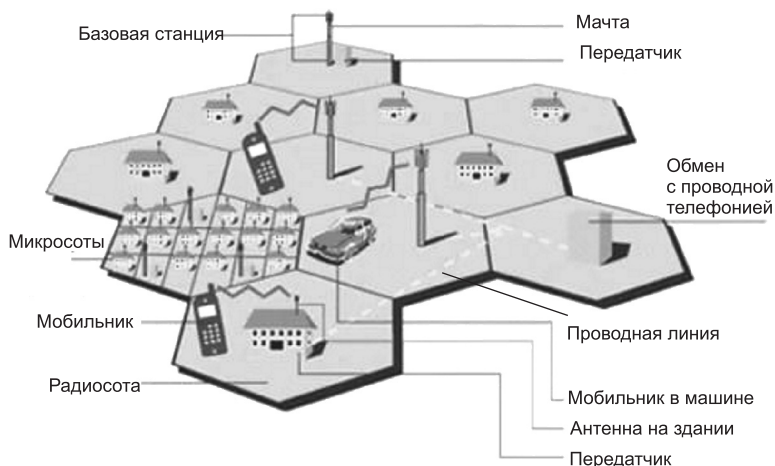
Потребности практики и организованные действия операторов связи в области «классической» тактовой сетевой синхронизации (ТСС) позволили в основном решить проблему синхронизации частоты на сети связи общего пользования (ССОП) с коммутацией каналов по технологиям синхронной и плезеохронной цифровых иерархий (SDH, PDH):

- имеются и действуют необходимые руководящие документы, инструкции, методики и измерительное оборудование, предназначенные для проектирования, строительства и эксплуатации систем «классической» тактовой сетевой синхронизации;
- функционируют базовая система ТСС (ПАО «Ростелеком») и аттестованные системы ТСС ряда операторов связи, обеспечивающие высококачественное предоставление различных услуг связи и опорных тактовых частот (2,048 МГц) в качестве услуги;
- подготовлены и успешно работают специалисты по проектированию, экспертизе, строительству, надзору, аудиту и эксплуатации систем ТСС.

На повестке дня решение новой актуальной задачи — синхронизация частоты и времени на ССОП России, вызванное:

- переходом сетей связи от технологии коммутации каналов (SDH, PDH) к технологии коммутации пакетов (IP/MPLS/Ethernet);
- переходом инфокоммуникаций на контент-ориентированные услуги;
- переходом к мобильным сетям следующих поколений (Next Generation Mobile Networks — NGMN, LTE);
- необходимостью проставления меток времени в прикладных и служебных файлах для выполнения многообразных задач (документирование времени поступления и выдачи информации, организация очередности обработки запросов, ситуационный анализ событий по временному признаку, задание последовательности управляющих воздействий во времени и т. п.).

LTE (long term evolution) — это фундамент, на основе которого строятся мобильные широкополосные сети будущего. Технология LTE является стандартом беспроводной передачи данных и дальнейшим развитием стандартов GSM/UMTS. Цель внедрения LTE — увеличение пропускной способности и скорости передачи информации с



**Рис. В.1.** Принцип организации сотовой связи

использованием новых методов цифровой обработки сигналов и модуляции, реконструкции и упрощения архитектуры сетей, основанных на IP, со значительным уменьшением задержки при передаче данных по сравнению с архитектурой 3G сетей.

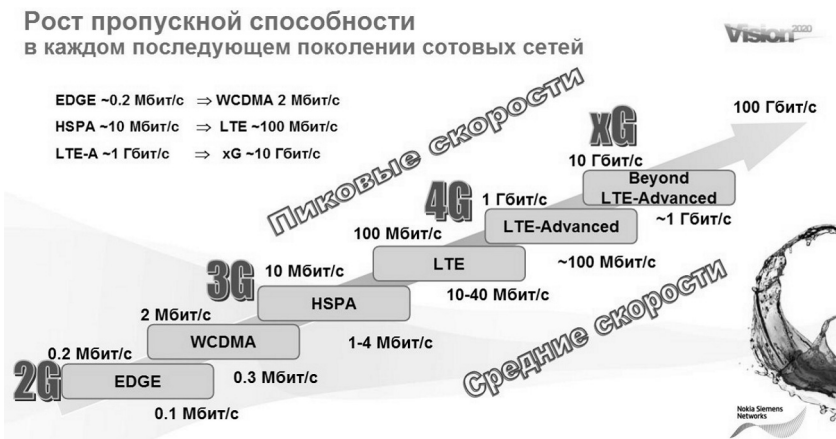
В LTE достижимы скорости передачи по нисходящему потоку до 300 Мбит/с, а по восходящему потоку до 75 Мбит/с и более. Задержка передачи данных может быть снижена до 5 мс.

По данным сотовых операторов на конец 2014 г. LTE присутствует в 79 регионах России. В зоне покрытия находится около 40 % населения.

Технология LTE позволяет создать для абонентов наиболее комфортные, понятные, простые и выгодные условия для использования высокоскоростного (рис. В.1 и В.2) мобильного доступа к сети Интернет для бизнеса, развлечений, общения, обучения и полного спектра возможностей мировой сети. Помимо массового пользователя эта сеть нужна в таких проектах, как умные города, умный транспорт, интернет вещей, смарт-сервисы.

Хотя текущие планы предполагают, что, например, сети 5G должны заработать в пяти городах-миллионниках уже к 2022 г., потребности населения в таком покрытии к этому времени еще не будет, предупреждают «МегаФон», «ВымпелКом» и Tele2. Вместо этого операторы предлагают сначала протестировать новую технологию на сегменте b2b, в частности в области интернета вещей. Обычным абонентам в этом случае придется ждать 5G примерно до 2023–2025 гг.

Тем не менее инвестиции участников рынка в создание сетей 5G могут составить около 1 трлн руб., прогнозируют в «Ростелекоме».



**Рис. В.2.** LTE — высокоскоростной мобильный доступ к сети Интернет

Такие расходы заставят бизнес объединиться в консорциум либо создавать единого инфраструктурного оператора 5G, считают в госкомпании. Подобную идею обсуждают и европейские операторы, указывают эксперты. В России инициативу пока поддерживают аффилированный «Ростелекому» оператор Tele2 и власти Москвы, а Ericsson поставит МТС оборудование и программное обеспечение для 5G и технологий интернета вещей (IoT) на 400 млн евро, сообщает «РИА Новости» 23.10.2017 г. со ссылкой на пресс-релиз МТС. Достигнутое компаниями соглашение рассчитано на трехлетний срок, поставки будут осуществляться с 2017 по 2020 гг.

Правительство выделит в 2018 г. 12,5 млрд руб. для дальнейшего покрытия современной связью труднодоступных регионов страны. Ведется подготовка для внедрения мобильной связи пятого поколения (5G), например на территории инновационного центра «Сколково» уже запущена первая в России открытая опытная зона 5G. В 2019 г. должны быть утверждены радиочастоты и международные стандарты (Российская газета от 26.01.2018). Перспективные для 5G области — это промышленный интернет, беспилотный транспорт, видеоаналитика и ряд других направлений. Китай в 2018 г. приступил к разработке стандарта 6G.

LTE поддерживает в выделенных диапазонах 800 и 2600 МГц полосы пропускания частот от 1,4 МГц до 20 МГц. Дальнейшее повышение эффективности использования радиоспектра связано с использованием временного разделения каналов, требующего частотно-временной синхронизации.

В настоящий момент существуют две основные разновидности LTE: LTE FDD (Frequency Division Duplex), LTE TDD (Time Division

Duplex). Дальнейшее развитие стандарта — LTE Advanced, соответствующее требованиям к сетям четвертого–шестого поколений. Актуальными являются версии LTE FDD и LTE TDD. Основное отличие между ними — способ разделения каналов на прием/передачу. LTE FDD подразумевает две несущие частоты для приема/передачи, а LTE TDD — одну несущую частоту, но разделение приема/передачи по времени. Технология LTE FDD подразумевает достаточность частотной синхронизации, а LTE TDD обязательно требует фазовую синхронизацию, при которой возможно существенное повышение эффективности использования радиоспектра до 30 бит/с/Гц по нисходящему и до 15 бит/с/Гц по восходящему потокам соответственно.

LTE TDD является более гибкой в распределении пропускной способности нисходящего и восходящего потоков. Ее большое преимущество в том, что нужен только один зонный спектр вместо двух, т. е. способность до двух раз увеличить пропускную способность в выделенных полосах частот.

В реальных сетях используются оба типа технологий (Китай, Япония, США и др.), поэтому выбор синхронизации может быть различен. Однако не стоит забывать, что технология LTE Advanced изначально подразумевает использование фазовой (временной) синхронизации, поэтому целесообразнее сразу рассматривать фазовую синхронизацию с прицелом на будущее.

Среди основных требующих ответа вопросов при проектировании сетей Mobile Backhaul для LTE является вопрос выбора эффективного варианта осуществления синхронизации базовых станций (БС).

Существуют следующие наиболее распространенные варианты синхронизации:

- спутниковая — GPS/ГЛОНАСС;
- от существующей TDM-сети (SDH, PDH);
- с помощью пакетной сети на основе SyncE;
- с помощью пакетной сети на основе IEEE 1588v2.

Спутниковая частотно-временная синхронизация — проверенное временем рабочее решение, но требующее учета зависимости точности от атмосферных воздействий, активности Солнца и радиопомех, особенно в крупных мегаполисах. Невозможность работы в закрытых помещениях.

Преимуществом синхронизации от TDM-сети является использование существующей инфраструктуры без дополнительных вложений при возможности на всех планируемых узлах подключения к TDM-сети.

Технология SyncE (физический уровень) аналогична синхронизации TDM-сети, но позволяет восстановить с высокой точностью только частоту.

Стандарт IEEE 1588v2 подразумевает одновременную передачу частотной и фазовой информации и может подойти для систем LTE TDD и LTE Advanced. Передача пакетов IEEE 1588v2 происходит на логическом уровне, а следовательно, зависит от загрузки сети. Не исследованными остаются вопросы асимметрии задержек в прямом и обратном направлениях, поведения их во времени, возможности их компенсации. Тем не менее в мировой практике этому стандарту уделяется огромное внимание, так как ведущий сервер времени (ведущие часы), расположенный в ядре LTE-сети, может обслуживать десятки и даже сотни ведомых серверов времени (ведомых часов), расположенных в БС. Отпадает необходимость установки приемников GPS/ГЛОНАСС в каждой БС. Кроме того, использование фазовой (временной) синхронизации позволяет обеспечить устойчивую связь с мобильными абонентами при пересечении сот, создающими дополнительную неопределенность по частоте за счет эффекта Доплера.

В **Рекомендации МСЭ G.8271 (10/2010)** представлены требования к временной синхронизации LTE TDD и LTE Advanced. Диапазон требуемых значений  $\pm(0,5 \dots 1,5)$  мкс.

В **Рекомендации МСЭ-Т G.8272/Y.1367 (10/2012)** представлены требования к ведущему серверу (часам). Максимальная ошибка временного интервала не более 100 нс, а девиация временного интервала  $< 30$  нс на всем интервале эксплуатации, подразумевающем привязку к шкале UTC.

В **Рекомендации МСЭ-Т G.8271.1** определен бюджет ошибки времени в ведомых часах линии передачи из 10 коммутаторов по отношению к шкале времени ведущих часов. Суммарная допустимая погрешность, вносимая линией передачи из конца в конец, не должна превышать  $\pm(1 \dots 1,5)$  мкс.

**Рекомендация МСЭ-Т G.8275/Y.1367 (07/2013)** посвящена распределению времени и фазы в пакетных сетях. В целом в деятельности МСЭ-Т наблюдается, по существу, перезагрузка нормативной базы в области синхронизации по частоте, фазе и времени. Появились новые серии международных рекомендаций G.826X.X и G. 827X.X.

На 42-м Международном форуме по системам и приложениям точного времени (Precise time and time interval — PTTI) в ноябре 2010 г. сформулирована задача достижения к 2030 г. в глобальных сетях связи точностей на уровне десятков наносекунд. Аналогичные требования изложены в Рек. G.8273.

Международные форумы (2014–2017 гг.), семинар 2017 г. в Oscilloquartz, Швейцария, посвящены новому профилю PTP, требованиям LTE Advanced — HetNet — сотовым сетям с малыми сотами, 5G; по-иску альтернативных ГНСС источников сигналов времени. Повестка

3-го дня форума 2014 г. «Время под угрозой — уязвимость источников, сред распределения и средств доставки».

Имеется широкий выбор оборудования для передачи сигналов времени. К наиболее продвинутым разработкам зарубежных фирм можно отнести серверы РТР (ТР5000, ТР500, ТР1500) фирмы Symmetricom и (OSA 5331, 5320 и 5401) фирмы Oscilloquartz, а также отечественную аппаратуру распределения сигналов времени (АРСВ) производства ООО «АЛТО» с разрешением 15 нс, NTP и РТР серверы разработки ЗАО «НТЦ "КОМСЕТ"», Россия.

Для аттестации стыков 1 pps могут быть использованы перевозимые квантовые часы, образцовый комплект аппаратуры ГЛОНАСС/GPS с аппаратурной погрешностью в пределах  $\pm 3$  нс и  $\pm 50$  нс соответственно, поверяемые по государственной (ГОСТ 8.129-99) поверочной схеме.

Появляется оборудование для измерения всех параметров одновременно — вариации задержки пакетов (PDV), блуждания фазы (SyncE, TDM), частоты и фазы синхросигнала, например:

- портативный тестер синхронизации Calnex Sentinel — тестирование сети на пригодность к использованию в качестве пакетной транспортной инфраструктуры LTE-Advanced или TDD-LTE;
- Anue 3500 компании Ixia — устройство для тестирования синхронизации в пакетных сетях, CES и функций OAM;
- ТР5000 с измерительными функциями PDV;
- средство измерений МАКС-ЕМК (Е) производства ООО «Бинар-КОМ» (Москва), реализующее функции клиентов протоколов РТР и NTP измерения разности (расхождения) шкал времени по отношению к шкале UTC (SU), сформированной встроенным приёмником сигналов ГЛОНАСС/GPS.

Вышли в свет в последнее время книги, посвященные технологиям в системах радиосвязи на пути к 4G, 5G и 6G [63–66].

Таким образом, целесообразно обобщить современные требования к частотно-временному обеспечению транспортных, мобильных и сотовых сетей электросвязи на основе международных Рекомендаций МСЭ-Т, стандартов ETSI и руководящих документов Минкомсвязи РФ, отразить возникшие в связи с этим новые требования к оборудованию классической ТСС, к оборудованию фазовой и временной синхронизации, их конкретные реализации.

Выражаю глубокую признательность канд. техн. наук А.Ю. Насонову, А.П. Пшеничникову, а также рецензентам д-рам техн. наук, профессорам Н.Н. Удалову; С.С. Шаврину; А.В. Пестрякову за ряд ценных советов, способствовавших улучшению содержания пособия.