# ТЕХНОЛОГИЯ СЕТЕВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ LTE

*Часть 1. Архитектура*

**Г.Фокин**, д.т.н., проф. СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича / grihafokin@gmail.com,
**В.Григорьев**, д.т.н., проф., генеральный директор ООО "ЛИС" / vgrig@labics.ru,
**И.Авдонин**, заместитель начальника конструкторского отдела ООО "ЛИС" / avdoninivan@mail.ru

**УДК 621.396.969, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.104.4.34.41**

На сегодняшний день технологии сетевого позиционирования партнерского проекта 3GPP, использующие инфраструктуру сетей подвижной радиосвязи, наиболее широко внедрены в сетях стандарта 4G/LTE и обеспечивают точность определения местоположения пользовательских устройств (UE) в десятки метров. На порядок более высокая точность позиционирования в сетях 5G NR, с точки зрения народного хозяйства, является предметом среднесрочной и долгосрочной перспективы. Актуальность технических решений по определению местоположения UE в развернутых сетях 4G/LTE обусловлена невозможностью уверенного приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем в сценариях плотной городской застройки. В первой части исследования, посвященного технологиям сетевого позиционирования 4G, формализована архитектура системы определения местоположения пользовательских устройств с использованием инфраструктуры сетей подвижной радиосвязи LTE.

## Введение

Развитие сетей подвижной радиосвязи LTE, LTE-Advanced [1] и 5G [2] завершило оформление технологий сетевого позиционирования партнерского проекта 3GPP в отдельное направление исследований и разработок [3]. Существенный вклад в развитие технологий определения местоположения (ОМП) с использованием инфраструктуры спутниковых и наземных систем сетевого позиционирования внесли как отечественные [4], так и зарубежные [5–9] авторы. Несмотря на высокую потенциальную точность глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в ряде сценариев [10, 11], известной их проблемой является невозможность уверенного приема сигналов ГНСС пользовательскими устройствами в плотной городской застройке (рис.1).

В данном сценарии велика вероятность отсутствия прямой видимости (NLOS – Non Line Of Sight) UE со спутником, в то время как с базовыми станциями eNodeB (eNB) сети LTE прямая видимость вполне может быть обеспечена (LOS), особенно в условиях повышенной плотности их территориального распределения.

Несмотря на потенциальные возможности идентификации и компенсации условий NLOS в радиолиниях сетей мобильной связи [12, 13],

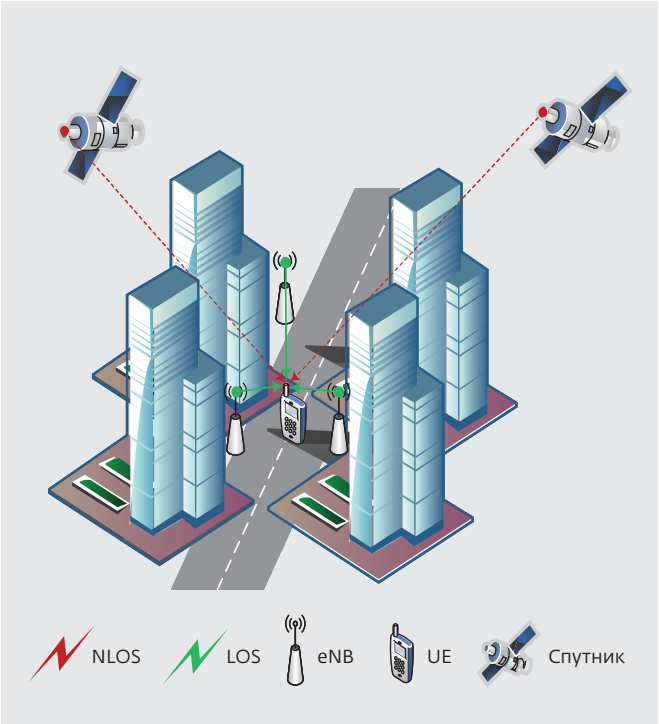


**Рис.1.** Позиционирование в сценариях городской застройки

в том числе за счет пространственной обработки сигналов [14, 15] для систем ОМП, использующих дальномерные [16], разностно-дальномерные [17, 18] и угломерные [19–21] первичные измерения, предпочтительным вариантом является сценарий LOS с максимальной энергетикой принимаемых сигналов [22]. Анализ возможностей ОМП устройств UE в сетях LTE по отечественным [23–25] и зарубежным [26] источникам позволяет сделать вывод о точности позиционирования в единицы-десятки метров в зависимости от ряда факторов, включая свойства используемых специальных опорных сигналов позиционирования (PRS – Positioning Reference Signals) [23], геометрический фактор топологии элементов опорной инфраструктуры сетей LTE – eNB [24, 25], а также занимаемую полосу частот [26]. Потенциал повышения точности позиционирования устройств связан, в первую очередь, с комплексированием разнородных первичных измерений различных технологий радиодоступа (RAT – Radio Access Technologies) гетерогенной сети, которое осуществляется в ядре сети LTE [27].

Целью настоящей работы является формализация подсистемы сетевого позиционирования, функционирующей в составе архитектуры сети LTE, согласно спецификациям 3GPP [28–32]. Материал настоящей статьи организован далее следующим образом: сначала рассматривается обобщенное описание архитектуры сети LTE, затем приводится формализация архитектуры подсистемы позиционирования в составе экосистемы LTE, в том числе в плоскостях управления и пользователя. Затем приводится обобщенная характеристика качества обслуживания процедур позиционирования пользовательских устройств в сетях LTE.

## Архитектура сети LTE

Сети LTE стандартизированы 3GPP как эволюция сетей UMTS. Рис.2 иллюстрирует архитектуру сети LTE.

Архитектура сети LTE включает в себя сеть радиодоступа (СРД) E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) и ядро сети EPC (Evolved Packet Core). Предпосылками создания новой архитектуры сети LTE на уровне E-UTRAN стала унификация оборудования базовых станций сети данного стандарта на уровне радиодоступа в виде узла eNB.

eNB может поддерживать режим частотного (FDD) и временного (TDD) дуплекса. Также базовая станция может поддерживать различные технологии радиодоступа RAT, включая LTE. Для повышения точности позиционирования UE в более поздних релизах LTE была добавлена поддержка специализированных маяков (beacons) и блоков определения местоположения (LMU – Location Measurement Unit). Предпосылками создания новой архитектуры сети LTE на уровне EPC была унификация оборудования ядра сети независимо от используемых технологий RAT.

### Архитектура сети радиодоступа LTE

На уровне СРД сота (cell) характеризуется собственным идентификатором cellID, который доступен пользовательским устройствам UE в радиоэфире. Каждая базовая станция eNB и обслуживаемая ею сота имеет уникальный глобальный идентификатор ID, образованный идентификатором ID базовой станции eNB и глобальным идентификатором соты (ECGI – Evolved Cell Global Identity) соответственно для идентификации конкретной соты внутри Location Area; при этом каждая eNB может обслуживать несколько сот (секторов).

Радиосвязь в E-UTRAN между eNB и UE осуществляется по радиоинтерфейсу LTE-Uu

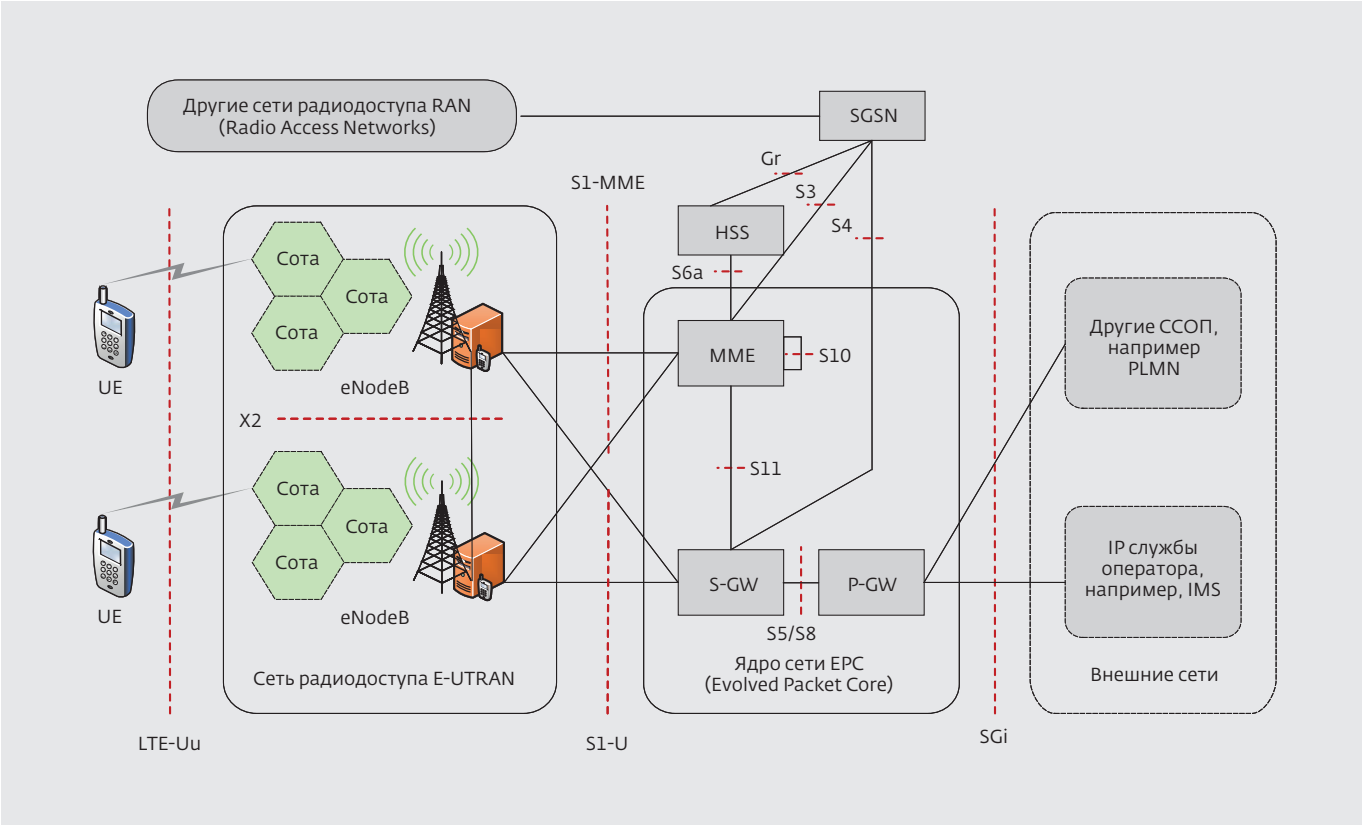


**Рис.2.** Архитектура сети LTE

(рис.2). Внутри E-UTRAN базовые станции соединяются между собой по логическому интерфейсу X2, используемому преимущественно для управления радиоресурсами и мобильностью на уровне сети радиодоступа.

Связь E-UTRAN с EPC осуществляется по логическому интерфейсу S1. Протоколы, структуры и интерфейсы сети радиодоступа LTE E-UTRAN организованы в двух логически независимых плоскостях: управления и пользователя. Плоскость управления включает протоколы приложений (AP), работающие поверх нескольких интерфейсов через различные узлы, например: S1-AP – протокол приложения поверх интерфейса S1; X2-AP – протокол приложения поверх интерфейса X2; а также обеспечивает сигнализацию для доставки сообщений протокола приложений AP. Верхним протокольным уровнем в плоскости управления является уровень без доступа (NAS – Non-Access Stratum) – функциональный уровень в LTE стека протоколов между EPC и UE. NAS используется для управления установлением сеансов связи и для поддержания связи с UE во время движения. В отличие от NAS, функциональный уровень (AS – Access Stratum) отвечает за передачу данных. NAS использует протокол управления радиоресурсами (RRC – Radio Resource Control) поверх радиоинтерфейса LTE-Uu и интерфейса S1-AP. Плоскость пользователя включает передачу данных по протоколу туннелирования.

### Архитектура ядра сети LTE

Блок управления мобильностью (MME – Mobility Management Entity) отвечает за функционирование плоскости управления и является опорным узлом в ядре сети для сигнализации NAS. Функционирование в плоскости пользователя реализуется в обслуживающем шлюзе сети стандарта LTE SGW (Serving Gateway), отделенном от блока MME. Интерфейс S1 между eNB и MME, обозначаемый S1-MME, используется для организации позиционирования UE в плоскости управления. Интерфейс S1 между eNB и S-GW, обозначаемый S1-U, применяется для организации позиционирования UE в плоскости пользователя. Данные пользовательского устройства, необходимые для процедур управления мобильностью, хранятся в сервере

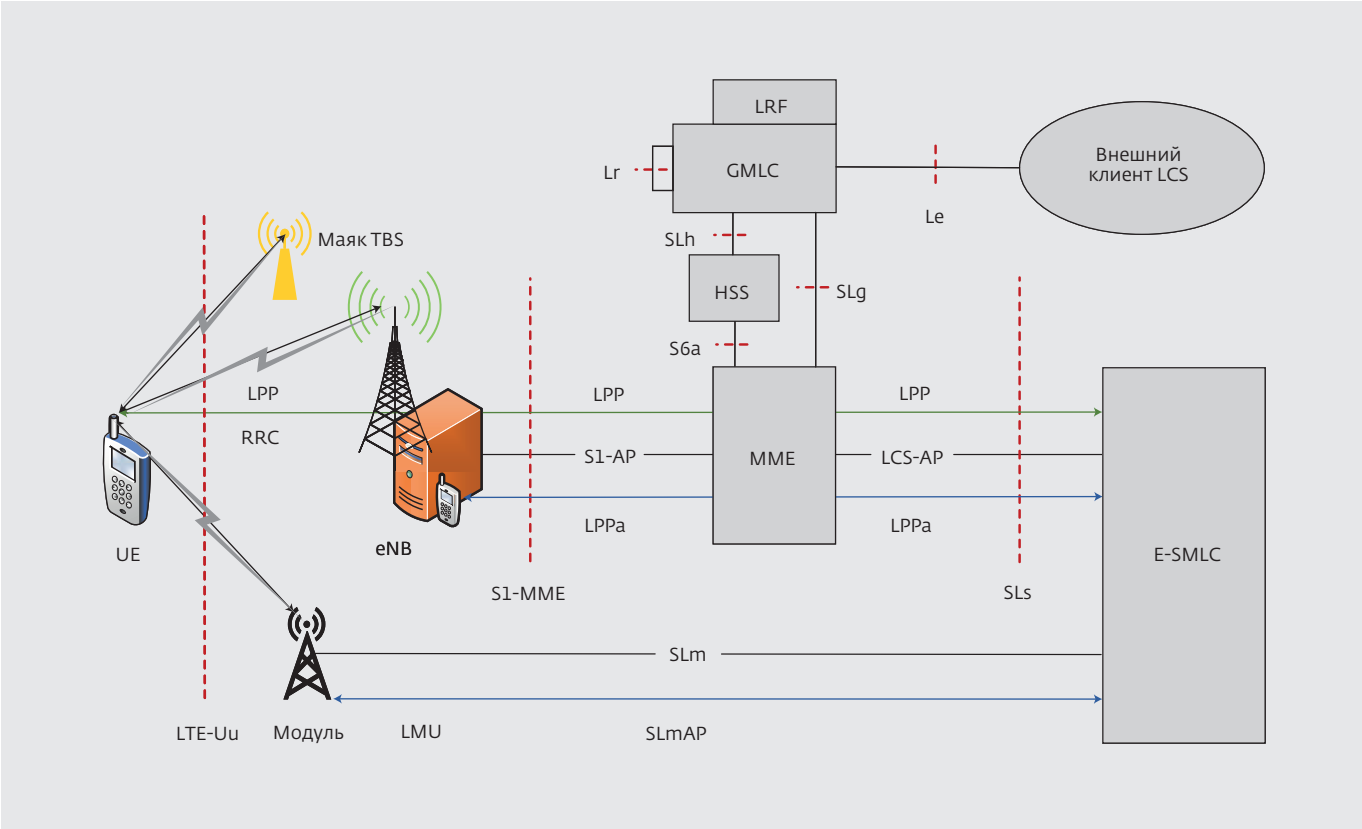


**Рис.3.** Архитектура позиционирования сети LTE в плоскости управления

абонентских данных сети стандарта LTE HSS (Home Subscriber Server).

## Архитектура системы позиционирования сети LTE

Для решения задач по предоставлению услуг позиционирования LCS (Location Service) в архитектуре сети LTE 3GPP определены следующие три элемента [28]: клиент LCS; объект LCS; сервер LCS.

**Сервер LCS** представляет собой физический или логический элемент сети, управляющий позиционированием объекта LCS путем реализации следующих процедур:

- сбор первичных измерений и других необходимых для определения местоположения UE данных;
- обеспечение пользовательского устройства необходимыми данными сопровождения для сбора и обработки измерений;
- вторичная обработка первичных измерений и оценка координат UE.

**Клиент LCS** представляет собой физический или логический элемент сети, взаимодействующий с сервером LCS для получения данных позиционирования одного или нескольких объектов LCS.

**Объект LCS** представляет собой физический или логический элемент сети, выступающий в роли объекта определения местоположения, и может выступать в роли клиента LCS.

Клиент LCS является потребителем услуг определения местоположения LCS. Сервер LCS обрабатывает поступающие от клиента LCS запросы и отправляет результаты оценки координат (ОК) объекту LCS.

В зависимости от используемого метода позиционирования в качестве первичных измерений могут выступать параметры радиосигнала, принятые или переданные объектом LCS. Радиосигналы, переданные объектом LCS, принимаются eNB; радиосигналы, принятые объектом LCS, передаются базовыми станциями или спутниками ГНСС.

Для повышения точности позиционирования, помимо приема радиосигналов LTE и ГНСС, объекты LCS могут дополнительно использовать прием сигналов систем наземных маяков (TBS – Terrestrial Beacon System). Система

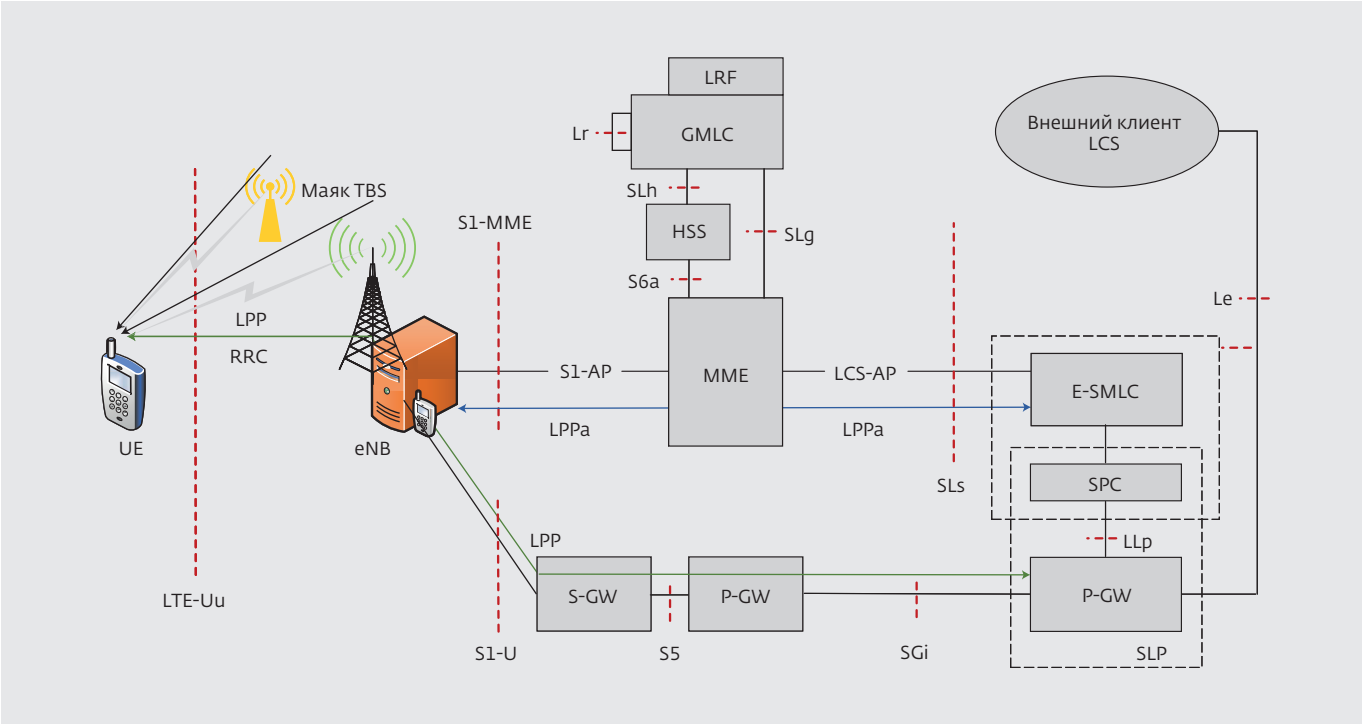


**Рис.4.** Архитектура позиционирования сети LTE в плоскости пользователя

TBS образована территориально распределенными маяками, излучающими исключительно сигналы для задач позиционирования, например PRS.

Для повышения точности позиционирования при передаче радиосигналов объектами LCS в сети могут быть развернуты дополнительные модули измерения местоположения LMU. Эти модули могут быть как отдельно стоящими, так и совмещенными с eNB. Модули LMU осуществляют сбор первичных измерений по радиосигналам в канале "вверх" (UL), излучаемым объектами LCS в UL; затем LMU отправляют эти первичные измерения в сервер LCS для их вторичной обработки и оценки координат.

Шлюзовой центр позиционирования (GMLC – Gateway Mobile Location Center) является первым узлом, через который поступает запрос на позиционирование от внешнего клиента LCS сети подвижной связи общего пользования (PLMN – Public Land Mobile Network) по интерфейсу Le.

После выполнения регистрации и авторизации клиент LCS отправляет запрос на позиционирование в узел управления мобильностью (MME – Mobility Management Entity). Результат позиционирования клиент LCS получает от соответствующего элемента сети по интерфейсу SLg. Функция возврата местоположения (LRF – Location Retrieval Function), интегрированная в GMLC, отвечает за возврат или валидацию данных местоположения, обеспечивая, таким образом, сеть LTE данными об инициаторе запроса на ОМП через подсистему IMS.

В 9-м релизе 3GPP были специфицированы два новых протокола для поддержки услуг позиционирования: протокол позиционирования LPP (LTE Positioning Protocol) [29] и дополнение к протоколу позиционирования LPPa (LPP annex) [30]. LPP – это протокол типа точка-точка между сервером LCS и устройством – объектом LCS, используемый для позиционирования устройства-объекта LCS. Для протокола LPP специфицированы следующие транзакции запрос/ответ:

- процедура проверки готовности;
- процедура передачи данных сопровождения позиционирования;
- процедура передачи результатов позиционирования – оценок координат.

Перечисленные процедуры могут выполняться последовательно и/или параллельно. Протокол LPP используется для позиционирования как в плоскости управления (CP – Control Plane) (рис.3), так и в плоскости пользователя (UP – User Plane) (рис.4).

Протокол LPPa специфицирован для позиционирования исключительно в CP, однако

при сетевом взаимодействии плоскостей CP и UP протокол LPPa также может быть задействован и при организации позиционирования в плоскости пользователя при формировании запросов на eNB и сборе первичных измерений с eNB без установления связи с устройством UE. Для поддержки позиционирования по разности времен прихода сигналов в канале "вверх" UTDOA в 11-м релизе 3GPP был специфицирован протокол SLmAP [31], работающий поверх интерфейса SLm между LMU и сервером LCS.

### Архитектура позиционирования сети LTE в плоскости управления

Рис.3 иллюстрирует архитектуру системы позиционирования сети LTE в плоскости управления CP.

Для реализации сервисов LCS в плоскости управления сети LTE должны иметься по меньшей мере два элемента: улучшенный обслуживающий центр позиционирования (E-SMLC – Evolved Serving Mobile Location Center) и шлюзовой центр позиционирования (GMLC). При этом E-SMLC управляет координацией и планированием ресурсов для позиционирования UE, а GMLC управляет доставкой сообщений, содержащих данные позиционирования, авторизации, начисления платы и др. Сообщения протокола LPP передаются прозрачно в блок управления мобильностью MME с использованием протокола управления радиоресурсами RRC в качестве транспортного протокола поверх интерфейса S1-MME, а также с использованием протокола LCS-AP поверх интерфейса SLs между eNB и E-SMLC. По протоколу LPPa организуется обмен сообщениями сопровождения процедур позиционирования. Сообщения протокола LPPa передаются прозрачно в блок управления мобильностью MME по интерфейсам S1-MME и SLs.

Формализуем укрупненную последовательность процедур позиционирования в CP. Допустим, блок управления мобильностью MME получает запрос на позиционирование объекта LCS от клиента LCS. Затем MME отправляет запрос LCS в сообщении протокола LCS-AP в E-SMLC. Центр позиционирования E-SMLC, получив запрос, обрабатывает его для позиционирования объекта LCS. После обработки запроса E-SMLC возвращает результат позиционирования (оценку координат) обратно в блок MME. Блок управления мобильностью затем возвращает результат позиционирования клиенту LCS.

### Архитектура позиционирования сети LTE в плоскости пользователя

Рис.4 иллюстрирует архитектуру системы позиционирования сети LTE в плоскости пользователя UP.

Безопасное позиционирование в плоскости пользователя SUPL (Secure User Plane Location) поддерживает и дополняет организацию процедур и протоколов позиционирования в плоскости управления для снижения нагрузки на плоскость управления от предоставления услуг LBS (Location Based Service) в сети LTE. При позиционировании по протоколу SUPL используются установленные трафиковые каналы LTE в плоскости пользователя и протоколы позиционирования, включая LPP, для организации обмена сообщениями между объектом LCS и сервером LCS. С точки зрения модели взаимодействия открытых систем (MBOC) протокол SUPL находится на уровне приложений и использует протокол LPP, при этом SUPL выступает в качестве транспортного протокола для LPP.

После установления соединения TCP/IP инициации SUPL и начала сессии LPP поток сообщений LPP в плоскости пользователя может быть таким же, как и в протоколе LPP плоскости управления с тем отличием, что объектом LCS выступает SUPL-терминал (SET – SUPL Enabled Terminal), а сервером LCS выступает SUPL платформа позиционирования SLP (SUPL Location Platform). SUPL-платформа позиционирования SLP реализует функции центра локации (SLC – SUPL Location Center) и центра позиционирования (SPC – SUPL Positioning Center). SPC при этом может быть интегрирован в E-SMLC. SLC координирует функционирование SUPL в сети LTE и реализует следующие функции при взаимодействии SUPL и SET в плоскости пользователя: безопасность, инициацию, защищенность, поддержку роуминга, начисление платы, управление услугами, вычисление местоположения. Центр позиционирования SPC реализует такие функции SUPL, как защищенность, доставка данных сопровождения, возврат местоположения LRF, вычисление местоположения.

## Качество обслуживания процедур позиционирования

Качество обслуживания сервиса позиционирования представлено в E-SMLC в форме типа

клиента (Client Type). Тип клиента формируется в блоке управления мобильностью MME, шлюзовом центре позиционирования GMLC или другом узле сети, куда поступил запрос на позиционирование. В сети LTE различают восемь типов клиента [32].

Основными параметрами качества обслуживания QoS для сервисов позиционирования являются время ответа на запрос, горизонтальная и вертикальная точность. В сети LTE данные параметры могут сигнализироваться блоком управления мобильности MME в улучшенный обслуживающий центр позиционирования E-SMLC. Параметры QoS для сервисов позиционирования также могут быть запрошены от пользовательского устройства UE по протоколу LPP после установления сеанса позиционирования. Время ответа на запрос при этом лежит в пределах от 1 до 128 с.

Горизонтальная точность представляется набором из 128 кодов точности, каждый из которых задает радиус окружности неопределенности. Вертикальная точность представляется другим набором из 128 кодов точности. Горизонтальная и вертикальная точности характеризуются своим доверительным интервалом. Данный доверительный интервал показывает вероятность того, что UE находится в пределах заданной области неопределенности в окрестности полученной оценки координат (ОК). Для повышения точности ОК в вероятностном смысле доверительный интервал следует уменьшить.

Выбор наиболее подходящего в данных условиях метода позиционирования осуществляет E-SMLC на основе типа клиента и качества обслуживания QoS. Для этого на основе Client Type сначала определяется класс сервиса применительно к услугам позиционирования LBS, затем классу сервиса ставится в соответствие последовательность организации процедур позиционирования.

При первоначальном выборе метода позиционирования учитываются предыдущие конфигурации, ранее использованные методы, а также полученные с их помощью показатели качества. Для адаптивной конфигурации используемых методов/процедур позиционирования выполняется регистрация достигнутых показателей качества позиционирования и соответствующих параметров QoS в E-SMLC. Данные показатели после регистрации и накопления могут быть представлены в форме гистограмм для вероятностной оценки показателей времени реакции, горизонтальной точности, вертикальной точности, а также доступности того или иного метода позиционирования. По завершении первоначального выбора метода данная процедура может быть выполнена снова в том случае, если требуемые показатели QoS достигнуты не были.

## Заключение

Рассмотренная архитектура технологии сетевого позиционирования LTE является стандартизированной спецификациями 3GPP и рекомендуется к использованию для создания аппаратно-программного комплекса системы интеллектуальной навигации на основе сети технологической радиосвязи LTE.

## Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-00528). https://rscf.ru/project/22-29-00528/

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Высочин В.П.** Сети мобильной связи LTE/LTE Advanced: технологии 4G, приложения и архитектура. М.: Медиа Паблишер, 2014. 384 с.
2. **Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А.** Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. М.: Медиа Паблишер, 2019. 376 с.
3. **Фокин Г.А.** Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
4. **Фокин Г.А.** Технологии сетевого позиционирования. СПб: СПбГУТ, 2020. 558 с.
5. **Zekavat R., Buehrer R.M.** Handbook of position location: Theory, practice and advances. 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2019. 1376 p.
6. **Campos R.S., Lovisolo L.** RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House, 2015. 369 p.
7. **Sand S., Dammann A., Mensing C.** Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley, 2014. 280 p.
8. **Grewal M.S., Andrews A.P., Barton C.G.** Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. 4th Edition. Wiley, 2020. 608 p.
9. **Bensky A.** Wireless Positioning Technologies and Applications (GNSS Technology and Applications). Artech House, 2008. 305 p.

10. **Фокин Г.А.** Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 2. С. 3–9.
11. **Фокин Г.А.** Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 3. С. 13–21.
12. **Фокин Г.А.** Методика идентификации прямой видимости в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 78–82.
13. **Фокин Г.А.** Комплексная имитационная модель для позиционирования источников радиоизлучения в условиях отсутствия прямой видимости // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 85–101.
14. **Фокин Г.А.** Имитационное моделирование процесса распространения радиоволн в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 83–89.
15. **Киреев А.В., Фокин Г.А.** Позиционирование базовой станции в сетях LTE средствами пространственной обработки сигналов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей. СПб: СПбГУТ, 2014. С. 124–128.
16. **Киреев А.В., Фокин Г.А.** Позиционирование объектов в сетях LTE посредством измерения времени прохождения сигналов // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 1. С. 68–72.
17. **Сиверс М.А., Фокин Г.А., Духовницкий О.Г.** Позиционирование абонентских станций в сетях мобильной связи LTE разностно-дальномерным методом // Системы управления и информационные технологии. 2015. Т. 59. № 1. С. 55–61.
18. **Сиверс М.А., Фокин Г.А., Духовницкий О.Г.** Оценка возможностей метода разностно-дальномерного метода позиционирования абонентских станций в системах мобильной связи LTE средствами имитационного моделирования // Информационные технологии моделирования и управления. 2016. Т. 98. № 2. С. 149–160.
19. **Гельгор А.Л., Павленко И.И., Фокин Г.А., Горлов А.И., Попов Е.А., Лаврухин В.А.**, СиверсМ.А. Пеленгация базовых станций в сетях LTE // Электросвязь. 2014. № 9. С. 34–39.
20. **Киреев А.В., Фокин Г.А.** Пеленгация источников радиоизлучения LTE мобильным пунктом радиоконтроля с круговой антенной решеткой // Труды Научно-исследовательского института радио. 2015. № 2. С. 68–71.
21. **Киреев А.В., Фокин Г.А.** Позиционирование источников радиоизлучения в сетях LTE с использованием круговой антенной решетки // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2-х т. СПб: СПбГУТ, 2015. Т. 1. С. 122–126.
22. **Киреев А.В., Федоренко И.В., Фокин Г.А.** Оценка точности позиционирования объекта с помощью границы Крамера-Рао // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. С. 77–83.
23. **Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В.** Оценка влияния свойств сигнала PRS LTE на точность позиционирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 4. С. 94–103.
24. **Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В.** Исследование зависимости геометрического фактора топологии для разностно-дальномерного метода позиционирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 2. С. 86–93.
25. **Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В.** Исследование зависимости значения геометрического фактора снижения точности от топологии пунктов приема // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 2. С. 99–104.
26. **Fischer S.** Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE. Qualcomm White Pap. July. 2014. PP. 1–62.
27. **Фокин Г.** Эволюция сетевой архитектуры позиционирования в сетях подвижной радиосвязи // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2020. № 5 (90). С. 24–29.
28. PP TS 36.305. Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in E-UTRAN. Version 16.4.0. Sep. 2021.
29. PP TS 36.355. LTE Positioning Protocol (LPP). Version 17.0.0.Mar. 2022.
30. PP TS 36.455. LTE Positioning Protocol A (LPPa). Version 17.0.0. Apr. 2022.
31. PP TS 36.459. SLm interface Application Protocol (SLmAP). Version 17.0.0. Apr. 2022.
32. PP TS 29.171. Location Services (LCS); LCS Application Protocol (LCS-AP) between the Mobile Management Entity (MME) and Evolved Serving Mobile Location Centre (E-SMLC); SLs interface. Version 16.2.0. Dec. 2020.