

поширених графічних кодів DataMatrix, QR-кодів, PDF417 (які орієнтовані на роботу з латинськими послідовностями і мають значно гірші показники ущільнення для кирилических послідовностей [1, 4-5]).

### Література

1. Арманд В. А. Штриховые коды в системах обработки информации / В. А. Арманд, В. В. Железнов – М. : Радио и связь, 1989. – 92 с.
2. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон. – М.: Мир, 1976. – 594 с.
3. Цымбал В. П. Теория информации и кодирование / Цымбал В. П. – К. : Вища шк., 1982. – 304 с.
4. Дичка І. А. Структурні способи підвищення інформаційної щільності лінійних штрихових кодів / І. А. Дичка // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2002. – № 4 (24). – С. 13–19.
5. Тарасенко В. П. Штрихові коди та їх застосування / Тарасенко В. П., Дичка І. А., Голуб В. І. – К. : Корнійчук. – 2000. – 175 с.

Надійшла 5.8.2011 р.

УДК 004.7

К.В. КОЛЕСНИКОВ, Е.С. АНДРОСОВ  
Черкасский государственный технологический университет

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАДЕРЖЕК В ТЕХНОЛОГИИ LONG TERM EVOLUTION

*Технология Long Term Evolution (LTE) поколения 4G является важным шагом в развитии мобильных сетей. LTE основана на нескольких перспективных технологиях, таких как OFDM, MIMO и т.д., а также перспективной архитектуре System Architecture Evolution (SAE).*

*Основные целевые показатели производительности технологии LTE: значительное увеличение пика скорости передачи данных; значительное сокращение задержек в сети; улучшенная эффективность использования спектра сигнала; более низкая стоимость и сложность. Работа посвящена основным механизмам, которые применяются для сокращения задержек в сети LTE как в данных управления, так и в данных пользователя.*

*Certainly, the technology Long Term Evolution (LTE) of the generation 4G is an important step in the development of mobile networks. LTE is based on several advanced technologies such as OFDM, MIMO, etc., as well as an advanced architecture System Architecture Evolution (SAE).*

*The main targets of performance technology LTE: a significant increase in peak data rates; a significant reduction in network latency; an improved efficiency of the signal spectrum; the lower the cost and complexity. Work is devoted to basic mechanisms that are used to reduce delays in the network LTE, both in data management, and in the user's data.*

Ключевые слова: LTE, задержка, SAE, TTI, RLC, HARQ.

### Введение

Задержка имеет большое влияние на пользовательские приложения. В частности, голосовые услуги, такие как VoIP и видео-телефония, требуют низких задержек в сети. Игры и приложения с большим количеством подтверждений также требуют низких задержек в сети. Так как требования пользователей в плане поддержки всё новых и новых сервисов в мобильной среде постоянно растут, то мобильные технологии непрерывно эволюционируют.

Не представляется возможным сократить задержки без снижения transmission time interval (TTI). Round trip time (RTT) в GSM/EDGE – сетях составляет около 150 мс. WCDMA-сети ещё больше уменьшают задержку, в технологии HSDPA она составляет около 80 мс, технология Enhanced Uplink (HSUPA) позволяет добиться ещё большего уменьшения задержки. Дальнейшая эволюция уже в поколении 4G стремится (среди прочих целей) уменьшить задержки до уровня около 5 мс.

Основные механизмы для сокращения задержки включают: сокращение Time Transmit Intervals (TTI) и ускорение механизмов обратной связи (HARQ процедуры) [1].

Сокращение TTI существенно уменьшает задержку. TTI в EDGE составляет 20 мс, WCDMA сокращает TTI до 10 мс, в HSDPA она доведена до уровня 2 мс, технология LTE сокращает её до 0,5 мс.

Для тактовой синхронизации передатчика, через обратную связь передаётся информация при помощи radio link control (RLC). Протокол RLC обычно работает в режиме подтверждения, который требует ретрансляцию потерянных радиоблоков. Подтверждение отнимает много времени, т. к. организация обратного канала требует, чтобы приемник периодически отправлял (по запросу):

- подтверждения о радиопередачах;
- информацию о текущем состоянии радиообстановки.

Быстрая обратная связь позволяет передатчикам быстрее ретранслировать потерянные данные и делает радиопередачу более эффективной. Поставив более жесткие требования ко времени реакции и добившись быстрого реагирования на неудачные радиопередачи, можно добиться того, что потерянные радиоблоки ретранслируются гораздо быстрее, что в свою очередь сокращает задержки. Можно сократить время задержки ещё больше, объединив быструю обратную связь и сниженное значение TTI.

**Постановка задачі**

Целью работы является оптимизация задержек в технологии LTE для удовлетворения требований к задержкам современного программного обеспечения и сервисов.

VoIP и онлайн-игры являются очень важными приложениями для операторов. Для обеспечения целевых показателей и предложений улучшений существующих стандартов, необходимо рассмотреть и определить требования по оптимизации. Например, 3GPP определяет [2] требования, указанные в таблице 1.

Если VoIP в сетях HSDPA является основным механизмом для предоставления услуг голосовой связи и/или услуг видеосвязи, тогда требования к задержкам в сетях LTE не должны отличаться от существующих требований, которые были указаны в таблице 1.

Требования игр реального времени очень зависят от конкретной игры, и, разумеется, ресурсоемкие приложения потребуют очень коротких задержек. В соответствии с высокими требованиями интерактивных приложений, максимальная задержка в канале связи может иметь значение не более 75 мс, что приводит к пингу в 150 мс.

Джиттер нужно свести к минимуму, но это должно достигаться в большей степени при помощи алгоритмов в приложениях, а не в сети.

Таблица 1

**Требования к задержкам для конечных пользователей при голосовых и других услугах**

Вид трафика	Приложение	Тип симметричности	Скорость	Задержка в канале связи	Изменение задержки при звонке	Потеря информации
Аудио	Звуковая связь	Двунаправленная	4-25 Кб/с	< 150 мс рекомендованное; < 400 мс предел.	< 1 мс	< 3 %
Видео	Видео телефония	Двунаправленная	32-384 Кб/с	< 150 мс рекомендованное; < 400 мс предел; Синхронизация аудио с видео < 100 мс.	Изменения не допустимы	< 1 %
Данные	Телеметрия	Двунаправленная	<28.8 Кб/с	< 250 мс	н/д	Без потерь
Данные	Игры реального времени	Двунаправленная	< 60 Кб/с	< 75 мс	н/д	< 3 % рекомендовано; < 5 % предел
Данные	Telnet	Двунаправленная (асинхронная)	<1 Кб/с	< 250 мс	н/д	Без потерь

Для удовлетворения растущих потребностей пользователей и повышения уровня конкуренции со стороны новых технологий радиодоступа в перспективе, 3GPP инициировала исследование Evolved UTRA и UTRAN [3]. Цель данных исследований – долгосрочная эволюция 3G и 4G технологий. Развитие технологии LTE продолжается в рамках работ над новым стандартом 3GPP Release 10 (LTE Advanced). Сегодня уже сформулированы основные требования к нему [4]:

- максимальная скорость передачи данных в нисходящем радиоканале до 1 Гбит/с, в восходящем – до 500 Мбит/с (средняя пропускная способность на одного абонента – в три раза выше, чем в LTE);
- полоса пропускания в нисходящем радиоканале – 70 МГц, в восходящем – 40 МГц;
- максимальная эффективность использования спектра в нисходящем радиоканале – 30 бит/с/Гц, в восходящем – 15 бит/с/Гц (втрое выше, чем в LTE);
- полная совместимость и взаимодействие с LTE и другими 3GPP системами.

Для решения этих задач предполагается использовать: более широкие радиоканалы до 100 МГц; асимметричное разделение полос пропускания между восходящим и нисходящим каналами в случае частотного дуплекса; более совершенные системы кодирования и исправления ошибок; гибридную технологию OFDMA и SC-FDMA для восходящего канала, а также передовые решения в области антенных систем MIMO [5].

Другим важным фактором для долгосрочной эволюции сети LTE является оптимизация архитектуры для пакетных услуг, а также развитие quality of service (QoS) и на канальном уровне концепции.

**Результаты исследования****1. Архитектура SAE**

Учитывая требования к сокращению задержек и накладных расходов, имеет смысл рассмотреть архитектуру системы, которая содержит меньше узлов сети, так как это снижает общий объем протоколов обработки, снижает количество интерфейсов и стоимость тестирования совместимости. Меньшее число узлов может также привести к более простой оптимизации радиоинтерфейсов протоколов, например, путем слияния некоторых протоколов данных управления. Более короткие сигнальные последовательности

способствуют более быстрой установки сессии.

Концепция упрощённой системной архитектуры LTE тесно связана с 3GPP работой с System Architecture Evolution (SAE). SAE в настоящее время [6] определяет базовые линии высокого уровня для архитектуры системы, которая изображена на рис. 1, а также имеет большое влияние на новые элементы Evolved Packet Core (EPC) сети.

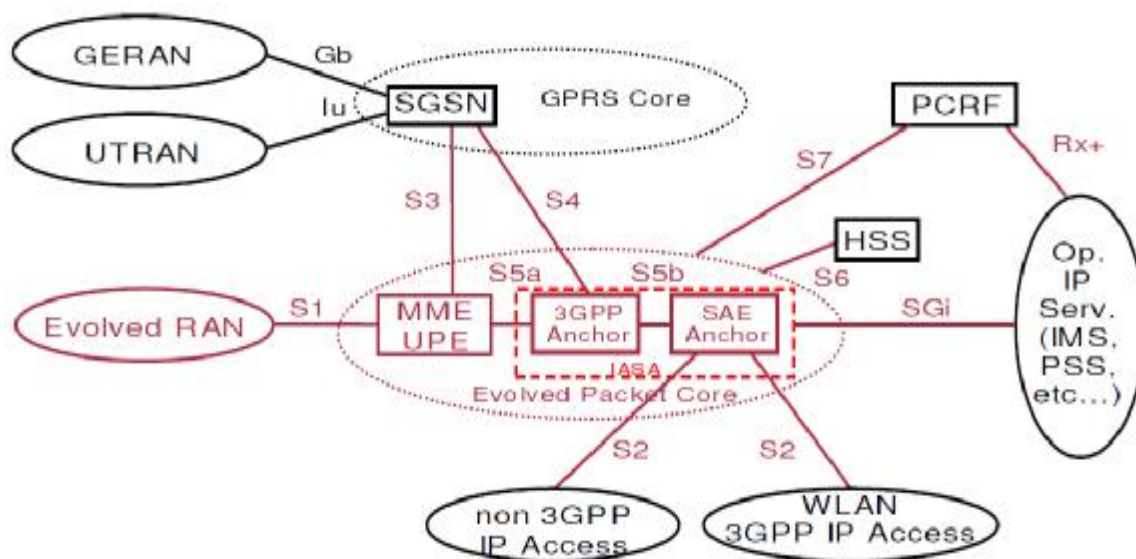


Рис. 1. Логическая архитектура верхних уровней для архитектуры SAE

Два новых понятия, связанные с LTE терминологией, названные как Access Gateway (aGW):

- Mobility Management Entity (MME): управляет и хранит UE контекст (в состоянии простоя: UE/идентификатор пользователя, UE состояние мобильности, параметры безопасности пользователя). Создаются временные идентификаторы, и они выделяются в UEs. Проверяется авторизация UE в TA или в PLMN. Выполняется аутентификация пользователей;
- User Plane Entity (UPE): прерывается в состоянии простоя UEs; также следит за состоянием пути для данных, сбросом триггеров инициализации подкачки по прибытию данных в UE. Управляет и хранит UE контекст. Выполняет репликацию пользовательского трафика в случае перехвата.

## 2. Концепция задержек в LTE

Борьба за снижение задержек имеет место в данных управления и данных пользователя. 3GPP определила это в TR 25.913 [6]. Задержка в данных управления связана с переходными состояниями оборудования сети (рис. 2), и перечислены ниже:

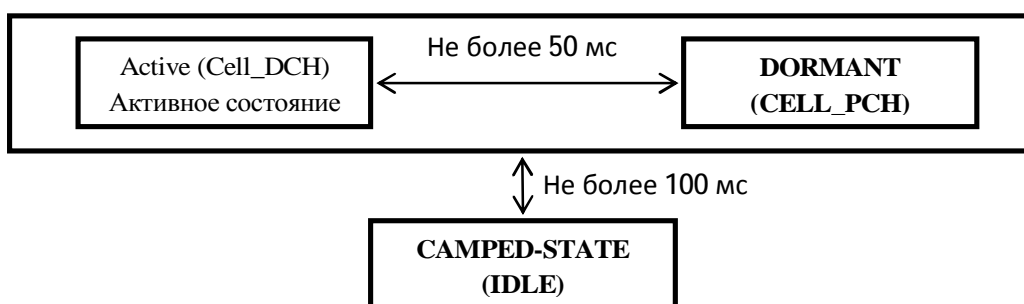


Рис. 2. Задержки при переходах между состояниями оборудования в сети LTE

- время перехода из режима ожидания (например, Release 6 Idle Mode) в активное состояние (например, Release 6 CELL\_DCH), где данные пользователя устанавливают, за исключением нисходящей задержки подкачки и NAS сигнализации. Задержка должна составлять не менее 100 мс;
- время перехода между неактивным (бездействующим) состоянием (например, Release 6 CELL\_PCH) и активным состоянием (например, Release 6 CELL\_DCH) составляет менее 50 мс (за исключением интервала DRX).

Возможность достижения высоких скоростей передачи данных во многом зависит от коротких задержек в системе, и предпосылкой этому является короткая длительность кадра. В LTE продолжительность кадра установлена максимально короткая 0.5 мс для сведения к минимуму радиоинтерфейсных задержек.

### 3. Задержка в данных управления

Согласно определениям концепции LTE/SAE, стек протоколов радиоуправления ранее размещался в RNC, в настоящее время он находится в eNode B. Стек протоколов данных пользователя делится между AGW и eNode B. Большинство из Rel-6 CN функциональных протоколов расположены в AGW/CPE.

Следующие элементы способствуют задержке в данных контроля:

- задержка при передаче;
- ретрансляция для надежной передачи;
- eNode B/UE L1/L2/L3.

Общее время задержки для изменения состояния от LTE\_IDLE к LTE\_ACTIVE будет зависеть от сокращения числа сообщений, которыми обмениваются между UE и NW до инициализации начала передачи данных.

Возможны две оптимизации [7] для LTE, включающие предложения: а) комбинированные передачи NAS сообщений приведут к значительному сокращению общей задержки, б) концепция радиоудержания по умолчанию. Учитывая это, одним из потенциальных результативных алгоритмов может быть следующая последовательность (UE инициализация передачи данных):

- 1) UE передает RRC запрос на соединение;
- 2) Запрос на соединение в результате в eNode B запрашивает передачу UE связанного контекста передачи от AGW;
- 3) AGW реагирует с начала процедур обеспечения безопасности и передачи контекста;
- 4) UE отправляет L3 ACK вместе с полным сообщением о безопасности, которое затем будет направлено в AGW. Затраченное время на получение способности UE передавать данные является конечной задержкой при переходе из режима ожидания передачи в активное состояние передачи.

Перечисленные этапы могут быть использованы для оценки каждого из случаев возникновения задержек. Конкретные значения задержек на каждом из этапов перехода из режима ожидания передачи в активное состояние передачи указаны в таблице 2.

Таблица 2

**Задержка в данных контроля при переходе из режима ожидания передачи в активное состояние передачи**

UE-eNode B		eNode B – aGW	
TX L3/L2 обработка	1 мс	TX обработка	0.5 мс
LI циклическая синхронизация	0.25 мс	Передача кадра	0.5 мс
TX LI обработка	2 x 0.5 = 1 мс	RCV обработка	1.0 мс
Передача кадра	0.5 мс	<b>ВСЕГО</b>	<b>2.0 мс</b>
HARQ ретрансляция	5 x 0.5 x 0.3 = 0.75 мс		
RCV LI обработка	2 x 0.5 = 1 мс		
RCV L3/L2 обработка	1 мс		
<b>ВСЕГО</b>	<b>5.5 мс</b>		

Пояснения и необходимые условия к данным, приведенным в таблице 2:

- предполагается, что каждое AS и NAS сообщение или их комбинация могут быть переданы в одном кадре. Всё затраченное время на обработку составляет 0,5 мс;
- на первом уровне время обработки займёт 2 x 0,5 мс как для передачи, так и для приёма. Дополнительная обработка в L2/L3 уровнях одного кадра рассматривается в каждом из узлов UE в отдельности;
- при шестиканальной SAW HARQ системе задержки суммируются на радиointерфейсе с вероятностью HARQ ретрансляции в пределах 30 %;
- выше уровня S1 данных контроля – предполагаются нулевые задержки.

Случайные процедуры доступа могут значительно увеличить задержку доступа. Для процесса перехода из LTE\_IDLE в LTE\_ACTIVE состояния, существует только одна процедура случайного доступа, которая нуждается в инициализации передачи RRC запроса на соединение в самом начале. Это обуславливает задержку в 10 мс. Фактическая задержка может зависеть от устойчивости сигнала, дизайна канала RACH и других параметров.

С учетом указанных выше данных, общая задержка для сообщения может составить 31 мс, как показано на рис. 3. После этой процедуры eNode B может планировать UE для DL и UL передач, что в свою очередь может привести к ещё дополнительной задержке в размере 2-3 мс, в итоге, общая задержка может достигнуть 34 мс.

UE может быть частью DRX; в этом случае, оно будет переходить в активное состояние в предварительно настроенные временные промежутки. Если UE, находящееся в DRX, потеряло синхронизацию в восходящем направлении, то UE будет нуждаться в передаче сообщения с использованием асинхронного RACH протокола. Задержка составит около 10 мс, прежде чем будет получено TIMING ADVANCE сообщение в восходящей передаче. После этого UE посылает планировщик информации, управляющий сетевым обеспечением ресурсов, что задерживает распределение ресурсов ещё на 2-3 мс.

Однако, не существует механизмов в HARQ, предполагающих процедуры случайного доступа. Это предполагает общую задержку в размере около 12-13 мс.

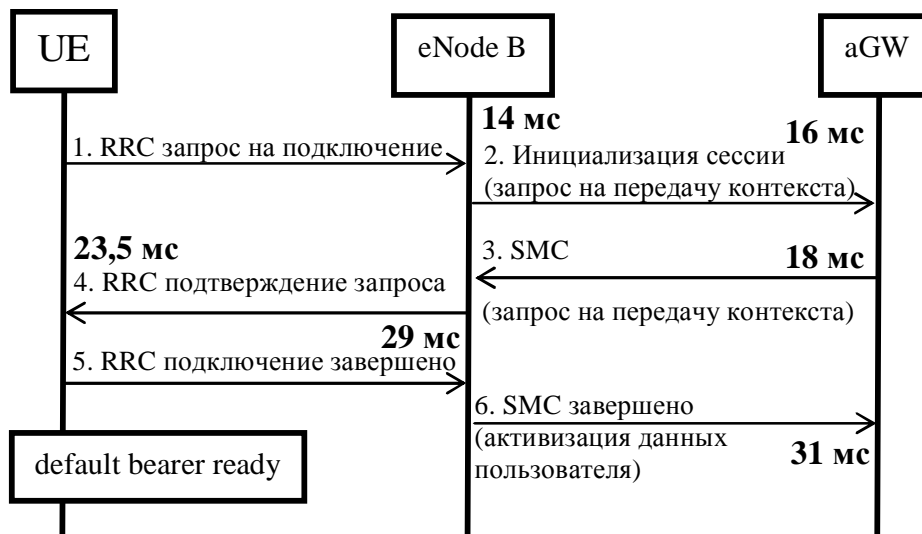


Рис. 3. Задержка при переходе с режима ожидания в активное состояние

#### 4. Задержка в данных пользователя

В 3GPP нет чёткого определения задержки в данных пользователя. Оценка, представленная в работе [8], показывают, что нет большой разницы в методах, что в свою очередь делает возможным достижение задержки в данных пользователя до уровня в 5 мс.

При оценке предполагается, что сеть работает с низкой нагрузкой. С точки зрения задержки это оправдывает предположения непосредственного планирования, как и в радиоинтерфейсе, так и в eNB и aGW интерфейсах. Это означает, что очереди задержек являются взаимоисключающими. В случае передачи данных от одного пользователя, можно считать, что нужная вероятность ошибки для доставки блока может быть достигнута без RLC и, возможно, даже без HARQ ретрансляции. К тому же использование IP пакетов малых размеров позволит поместить их целиком в один кадр, что в свою очередь позволит отказаться от сегментации пакетов.

В этом случае, будет иметь место минимально возможная задержка. Значение задержки в загруженных сетях может быть значительно выше, в частности, для низкоприоритетного трафика, так как длительность задержек в очередях станет доминирующей в таком случае. Далее предполагается, что UE находится в состоянии LTE\_ACTIVE и синхронизирован с сетью, то есть отсутствуют дополнительные задержки из-за случайных процедур доступа.

На основании вышесказанного, можно выделить такие компоненты для оценки задержки данных пользователя:

- задержка в результате UE обработки: сжатие заголовков, шифрование и RLC/MAC обработка;
- распределение ресурсов и задержка на физическом уровне при передаче: Tx LI обработка, TTI, выравнивание кадров и Rx LI обработка;
- задержка при HARQ ретрансляции;
- задержка при eNB обработке: RLC/MAC обработка;
- задержка в eNB-aGW (в SI интерфейсе);
- задержка при aGW обработке: декомпрессия заголовков и шифрование.

Значение задержки для радиоинтерфейса значительно зависит от TTI и задержки в UE-eNB и оценивается в 2 мс.

Для SI интерфейса считается, что задержки связаны с задержками распространения. Согласно скорости распространения в медных кабелях 200 000 км/с, расстояние между двумя узлами в 200 км в результате даёт задержку в 1 мс.

Наконец, задержка в размере 0,5 мс предполагается при обработке данных пользователя в aGW. В общей сложности, это даёт задержку от UE к aGW в размере 3,5 мс. Оценка задержек в разных компонентах данных пользователя LTE изображена на рис. 4.

Различные длительности HARQ ретрансляций и eNB-aGW задержек могут повлиять на длительность задержки. При достаточно редких HARQ ретрансляциях (<30 %) и задержке в eNB-aGW менее 1 мс, характеристики сети LTE позволяют достичь требуемой задержки в 5мс для IP пакетов малых размеров.

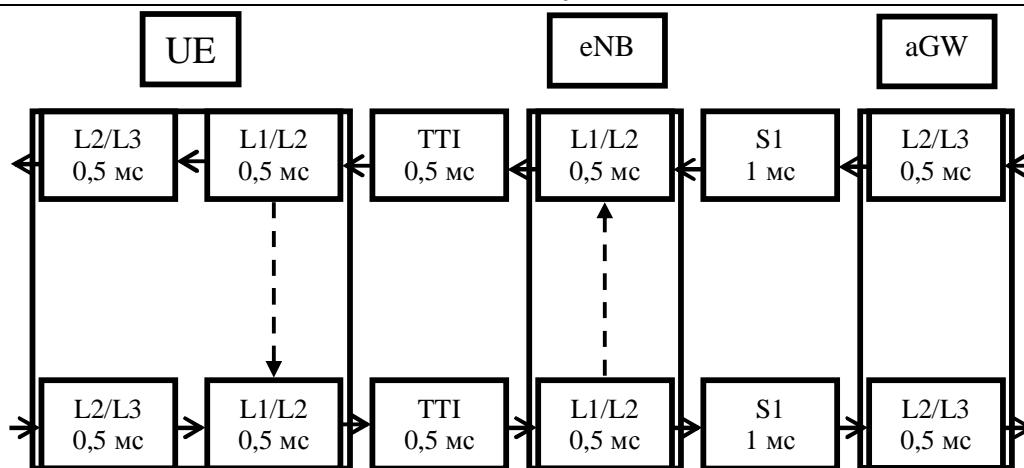


Рис. 4. Задержка в данных пользователя в сети LTE

### Выводы

LTE на физическом уровне имеет свои преимущества с точки зрения радиовещания, а именно, гибкое использование спектра сигнала и возможность адаптации в выделенной частотной области. Концепция LTE не ограничивается физическим уровнем, в ней имеется множество улучшений на уровне архитектуры и в протоколах верхних уровней, которые тесно взаимосвязаны с новой архитектурой SAE.

Наряду с другими основными целями этой технологии, аспект задержки становится все более и более важным для поддержки новых интерактивных услуг, таких как VoIP, онлайн-игры и т.д. Задержка в данных управления для переходов с режима ожидания в пассивный или активный режимы оборудования пользователей сети LTE соответствует заданным целям и составляет 100 и 50 мс соответственно. Задержка в данных пользователя сети LTE в условиях низкой загрузки сети достигает минимально возможного уровня – 5 мс, а при возрастании нагрузки на сеть значительно возрастёт.

### Литература

1. Тихвинский В. О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / С. В. Терентьев, А. Б. Юрчук – М. : Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
2. 3GPP TS 22.105 V8.2.0. "Services and service capabilities", December 2006.
3. 3GPP TR 25.814 V7.0.0. "Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)", May 2006.
4. 3GPP TR 36.913 V8.0.0. "Requirements for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)", Release 8. – 3GPP, June 2008.
5. Вишневикий В. Технология сотовой связи LTE – почти 4G / А. Красилов, И. Шахнович // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2009, № 1. – С. 62 – 72.
6. 3GPP TR 25.913 V7.3.0. "Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)", March 2006.
7. Motorola. "C-Plane Latency – Analysis", 3GPP TSG-RAN WG2 Meeting #53, May 2006.
8. Ericsson. "Concept evaluation of user plane latency in LTE". 3GPP TSG-RAN WG2 Meeting #53. May 2006.

Надійшла 14.8.2011 р.