

Разработка архитектуры интегрированной сети мобильного доступа 5G на основе адаптации технологии LTE

В. И. Тихонов, С. А. Нестеренко, Ю. О. Бабич, А. Л. Тахер,
В. В. Березовский

Розроблено архітектуру інтегрованої мережі мобільного доступу п'ятого покоління на основі адаптації технології LTE до завдань управління людино-машинними комплексами. Модифікована структура фрейму LTE, в якій виділено логічний канал передачі даних телеметрії зі зменшенням затримки. Запропоноване рішення розширює функціональні можливості управління мобільними абонентами і безпілотними технічними засобами в режимі реального часу

Ключові слова: зв'язок п'ятого покоління, мобільний доступ, інтегрована мережа, людино-машинна система, технологія LTE, режим реального часу

1. Введение

Согласно концепции ITU, сети будущих поколений (NGN) предполагают интеграцию большинства услуг на основе интернет протокола IP [1]. В частности, сети мобильной связи четвертого поколения (4G) предусматривают передачу всех видов мультимедийного трафика через IP путем инкапсуляции данных согласно стеку TCP/IP [2, 3]. Основанная на протоколе IP мультисервисная платформа IP Multimedia Subsystem (IMS) является определенным компромиссом между существующей инфраструктурой сети и новыми требованиями к качеству обслуживания [4]. Эти новые требования возникают в связи с широким применением микропроцессорных устройств, как стационарных, так и передвижных, объединяемых в сети мобильного доступа. Решение подобного рода задач рассматривается в рамках концепции интегрированной мобильной связи пятого поколения 5GIN (5G mobile Integrated Network). Сеть 5GIN включает отдельные сегменты традиционных телефонных сетей, а также специализированные системы межмашинного взаимодействия (M2M), сенсорные сети, структурные компоненты так называемого «интернета вещей» и т.п. [5, 6].

Управляемые сенсорные компоненты интегрированной сети мобильного доступа имеют, как правило, широкий спектр различных технических требований. Эти требования задают среднюю интенсивность потока данных, ограничение времени задержки, размеры сегментов пакетных данных, частоту передачи пакетов, а также допустимые флуктуации этих параметров. Технологии стандартов 4G предполагают использование высокоэффективных современных методов цифрового кодирования, основанных на ортогональном частотном уплотнении канала связи (OFDM).

Потенциальные возможности метода OFDM и его реализация в 4G позволяет решать более широкий круг задач, чем предусмотрено в базовых сервисах типа Triple Play (передача речи, файловых сообщений, потокового видео). Но с

другой стороны, стандарты и коммерческие технологии 4G на основе OFDM не могут в достаточной степени удовлетворить разнообразие требований к сетям 5G и, в первую очередь, поддержку приложений реального времени. В связи с этим, актуальным направлением исследований в области сетевых технологий является дальнейшая модификация технологии LTE и разработка интегрированных систем мобильного доступа пятого поколения на этой основе.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Стандарты сетей четвертого поколения опираются на пакет рекомендаций LTE-A и WiMax-2 [2, 3]. Опыт развертывания сетей 4G в различных странах (например, в Англии, Германии, Польше и др.), говорит о том, что для европейского региона, в т.ч. и для Украины, наиболее перспективным является внедрение технологии на основе стандартов LTE и LTE-A [7]. Особенность интегрированных сетей 5G заключается, в том, что элементами взаимодействия такой сети являются не только люди, но и быстродействующие электронные устройства. Эти устройства контролируются одним или несколькими централизованными процессорами в составе объединенной сети мобильного доступа. Типичным примером сети 5G может быть автоматизированная распределенная система, предназначенная для управления безопасностью движения на сложном транспортном перекрестке мегаполиса. В телефонных сетях достаточно объективным критерием динамичности является т. н. задержка в оба конца TWD (Two Way Delay). Циклическая задержка, помимо объективно составляющей TWD, также зависит от субъективных факторов (быстроты реакции собеседников и длительности сообщений, которыми они обмениваются). Телефонные сети на основе коммутации каналов с временным разделением (TDM – Time Division Multiplexing) имеют минимальную величину TWD, которая практически равна времени распространения электромагнитной волны по физическим каналам в оба конца. Стандартизованная величина задержки передачи голоса в один конец (One Way Delay – OWD) по современным цифровым телефонным сетям не должна превышать 100 мс [8]; при этом $TWD \leq 200$ мс. Это требование по ограничению задержки в оба конца может быть выполнено практически для любых двух абонентов современной телефонной сети общего пользования в пределах земного шара (возможно, за редкими исключениями).

Проблема контроля задержек передачи голоса является одной из самых сложных в сетях 4G при увеличении ее географических масштабов. На сегодняшний день одним из лучших решений в этом плане является сеть компании Verizon Mobile (США). Эта сеть имеет покрытие на всей территории США, и обеспечивает задержку голоса в одном направлении OWD (One Way Delay) в пределах 50 мс [9].

На данный момент неизвестны системы поколения 4G, которые функционировали бы в глобальном масштабе без использования традиционных транспортных каналов TDM на больших расстояниях. Анализ интеграции сетей LTE в масштабах США компанией “Verizon Wireless” показал, что технически возможным является создание глобальных систем 4G, в которых задержка в один конец не превысит 150 мс, а в оба конца – 300 мс [10]. В теории автоматическо-

го управления известным является тот факт, что временные задержки в цепи обратной связи контура управления негативно влияют на качество управления объектом [11]. В частности, увеличение задержки обратной связи в распределенных системах снижает быстродействие системы и приводит к возникновению паразитных автоколебаний, ухудшая точность поддержания заданных параметров.

В перспективных гетерогенных сетях мобильного доступа, элементами которых являются не только люди, но и разнообразные мобильные технические устройства, увеличение циклической задержки в контуре управления может означать потерю управляемости отдельных устройств. Это приводит к повышению риска возникновения аварийных ситуаций, а также к ограничению максимально допустимых скоростей движения объектов (например, пилотируемых или беспилотных транспортных средств).

В свою очередь, требуемая точность управления подвижными мобильными объектами существенно зависит от скорости изменения их параметров во времени и пространстве. По этим причинам, допустимая циклическая задержка в контуре управления мобильного объекта является одной из наиболее важных характеристик динамичности данного конкретного объекта в его взаимодействии с другими объектами интегрированной сетевой среды.

Современные стандарты и системы мобильной связи четвертого поколения ограничивают временные задержки передачи сигналов на уровне 10 мс в один конец. Это обеспечивает естественный комфорт с точки зрения восприятия речи при взаимодействии в режиме диалога человек с человеком. Однако такие ограничения задержек недостаточны для передачи данных цифровой телеметрии и эффективного взаимодействия современных быстродействующих мобильных устройств в режиме реального времени. С другой стороны, известные специализированные системы мобильной связи технических устройств являются, как правило, локальными и не интегрированы в телефонную сеть через мобильный интерфейс [12].

Как отмечено в [13], задержка пакетов является одним из ключевых показателей функционирования телекоммуникационных систем. С этой точки зрения, важным трендом в эволюции LTE является уменьшение задержки в радиоканале. В работе [14] акцентируется необходимость создания нового физического уровня технологии LTE, а также усовершенствованных процедур обработки данных на MAC-уровне и сетевой архитектуры для адаптации к требованиям широкополосного мобильного доступа разнообразных технических устройств в концепции «Интернет вещей». Авторы работы [15] полагают, что фундаментальным решением для сетей мобильного доступа 5G является сочетание существующей инфраструктуры сетей 4G с развитием новых возможностей LTE в штатных частотных диапазонах применительно к требованиям технических устройств.

Впервые усовершенствование технологии LTE в направлении уменьшения задержки пакетов было предпринято в рекомендациях 3GPP R14 в 2017 г. В частности, сформулирован принцип доступа в восходящей линии физического канала LTE в пределах 1 мс. Дальнейшие работы в этом направлении ориенти-

рованы на рекомендации 3GPP R15, которые запланированы на 2018 год. Внимание фокусируется на использовании более мелких временных фрагментов фрейма LTE (подфреймов, тайм-слотов и отдельных OFDM символов), [16]. Основная идея реализации такого подхода заключается в индивидуальном управлении отдельными символами с помощью введения нового нисходящего канала в основной полосе [17].

Анализ публикаций последних лет позволяет сделать вывод, что нерешенной задачей при построении интегрированных систем мобильного доступа пятого поколения является уменьшение длительности передачи пакетов в радиоканале до уровня 1 мс и менее для подключения быстродействующих сенсорных устройств.

3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка архитектуры интегрированной сети мобильного доступа пятого поколения на основе LTE для взаимодействия мобильных абонентов и объектов управления в режиме реального времени.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ особенностей применения стандартизированной технологии LTE в задачах реального времени с точки зрения временной структуризации фрейма LTE и потенциальных возможностей для сокращения времени задержки;
- модификация структуры фрейма LTE для работы в специальном режиме функционирования (режим ad hoc), в котором задержка передачи пакетов уменьшается в 10 раз по сравнению со стандартным режимом;
- разработка метода синхронного мультиплексирования данных телеметрии реального времени и асинхронного мультиплексированием пакетных данных.

4. Особенности функционирования технологии LTE в задачах реального времени

Распределенные системы, элементы которых взаимодействуют между собой в режиме реального времени, характеризуются таким важным показателем как циклическая задержка отклика условного «сервера» условному «клиенту». Например, если в процессе телефонного разговора один абонент («клиент») задал другому абоненту («серверу») вопрос, то время между окончанием озвученного вопроса и окончанием полученного ответа есть циклическая задержка; обозначим эту задержку CTD (Cyclic Time Delay). Величина CTD зависит от многих факторов, в т. ч. от задержки передачи сигнала по каналам связи, от длительности передаваемых сообщений в прямом и обратном направлении, а также от времени реакции сервера на запрос клиента.

Достаточно очевидно, что увеличение CTD приводит к замедлению процесса взаимодействия сетевых объектов, и в целом, – к снижению динамичности системы «клиент-сервер» (в широком понимании термина «динамичность»). С точки зрения технических требований к сетям 5G, технология LTE, с одной стороны, представляет собой перспективную платформу 4G, которая может быть усовершенствована и адаптирована к требованиям сетей по-

коления 5GIN. Но с другой стороны, технология LTE имеет определенные ограничения по задержке передачи сообщений, которая обусловлена фиксированной длительностью фрейма LTE и частотой передачи этих фреймов. Циклическая задержка в сетях мобильного доступа на основе LTE может оказаться неприемлемой для подключения быстродействующих и высокоскоростных объектов управления в составе интегрированной сети 5GIN.

Рассмотрим некоторые свойства технологии LTE, которые являются актуальными с точки зрения ее возможной адаптации к техническим требованиям интегрированной мобильной сети пятого поколения 5GIN. Как известно, базовая станция (eNB) радио сети доступа LTE циклически генерирует полуфреймы нисходящей линии (DL) длительностью 5 или 10 мс в зависимости от режима дуплекса (временного TDD или частотного FDD соответственно). Частота генерации полуфреймов является фиксированной независимо от режима TDD или FDD, и равна 100 Гц. Нисходящий полуфрейм анализируется всеми активными устройствами UE соты, рис. 1.

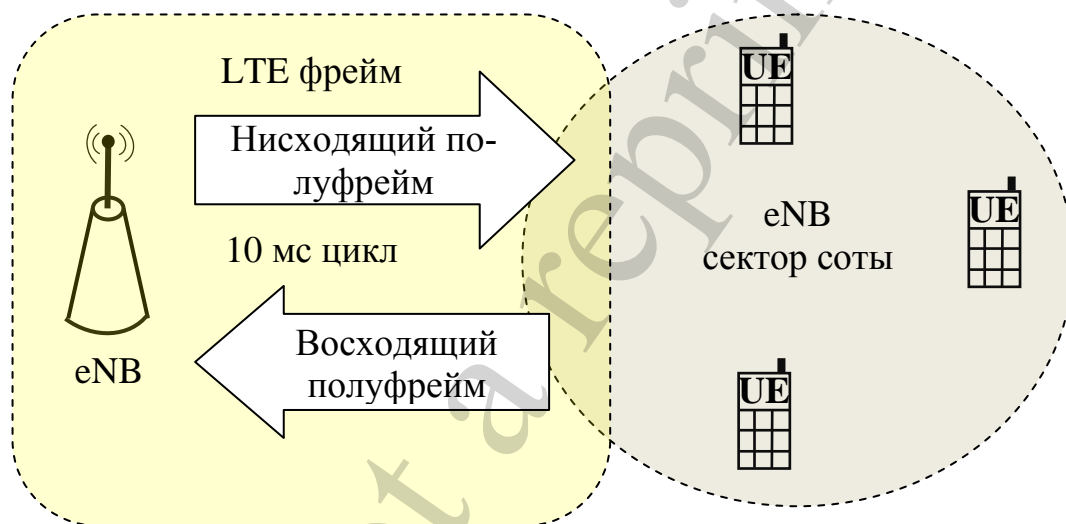


Рис. 1. Общая функциональная схема сети доступа LTE

Каждое устройство UE воспринимает адресованную непосредственно ему часть полуфрейма. Полуфрейм содержит весь набор поднесущих дискретных частот данного диапазона с шагом дискретизации частоты 15 КГц. Например, в диапазоне 5 МГц используется 300 поднесущих частот. Активные устройства соты совместно генерируют полуфрейм восходящей линии (UL), который адресован приемнику базовой станции eNB. Однако каждое устройство UE использует только выделенный ему набор поднесущих (например, 12 дискретных гармоник из общего числа 300).

На рис. 2 показана структура полуфрейма для полосы частот 3 МГц в режиме FDD. Нисходящий и восходящий полуфреймы имеют частотно-временную структуру в виде решетки (LTE grid). Решетка полуфрейма LTE разделена на 10 подфреймов длительностью 1 мс каждый; это разделение отображается в горизонтальном плане решетки. В вертикальном плане, решетка по-

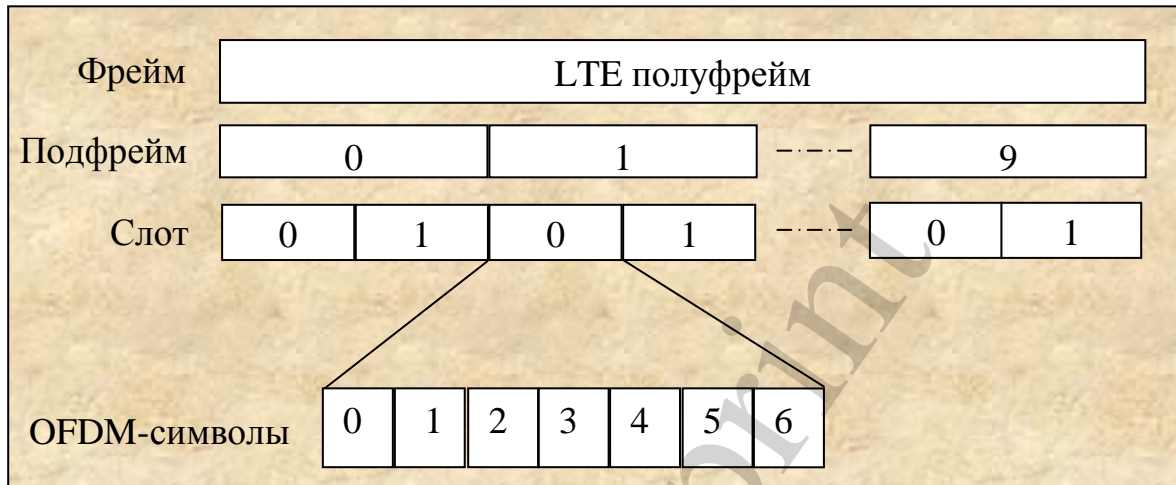
[illegible]

Рис. 2. Общая структура нисходящего полужрейма LTE

На логическом уровне, OFDM-символ представляет собой комплексную выборку модулированного сигнала, сформированного математически в виде суммы ряда Фурье от всех поднесущих гармоник. Математическое понятие «комплексной суммы ряда Фурье» реализуется на физическом уровне методом I/Q-модуляции, т. е. путем наложения двух отдельно полученных сигналов (суммы всех косинус-компонент, как функция I , и суммы синус-компонент, как функции Q).

Период следования элементарных единиц информации в составе фрейма LTE (т. е. OFDM-символов) определяется фиксированной длительностью одного тайм слота (0.5 мс) и количеством OFDM-символов в составе одного тайм-слота (6 или 7). Максимальная длительность одного OFDM-символа равна

$$\Delta t_{OFDM} = \frac{0.5}{6} \text{ ms} \approx 0.0833 \text{ ms}.$$



LTE фрейм = 10 мс; FDD полуфрейм = 10 мс;

FDD полуфрейм содержит 10 подфреймов;

Подфрейм = 1 мс и содержит 2 слота;

Слот = 0.5 мс и содержит 6 или 7 OFDM символов;

OFDM-символ = 0.5/6 (или 0.5/7) мс = 0.0833 (или 0.0714) мс

Рис. 3. Временные составляющие нисходящего полуфрейма LTE

Таким образом, минимальная частота следования OFDM-символов в радиоканале LTE составляет

$$f_{OFDM} = \frac{1}{\Delta t_{OFDM}} = \frac{6}{0.5 \text{ ms}} = 12 \text{ KHz},$$

что превышает частоту следования фреймов LTE в 120 раз. Соответственно, задержка переноса информации OFDM-символом в 120 раз меньше задержки переноса фрейма LTE. Эти параметры определяют потенциальные возможности адаптации технологии LTE к требованиям сетей 5G в смысле повышения их динамических свойств.

5. Модификация фрейма LTE для уменьшения задержки передачи пакетов

Современные системы мобильной связи 4G, в отличие от систем традиционной телефонии на основе каналов TDM, используют пакетный способ пере-

дачи данных. В частности, в радиоканале LTE данные передаются периодически циркулирующими фреймами с фиксированной длительностью фрейма, равной 10 мс (частота циркуляции фреймов составляет 100 Гц). Таким образом, передача голоса в сети LTE осуществляется выборками аудио сигнала длительностью 10 мс каждая, которые обычно подвергаются операции сжатия и помехоустойчивого кодирования на уровне вокодеров. При передаче речевых пакетных сообщений по пакетным сетям также возникают дополнительные задержки различного характера. Каждый фрейм LTE является логическим объединением двух физических полуфреймов – нисходящего полуфрейма, формируемого базовой станцией, и восходящего полуфрейма, формируемого всеми активными мобильными устройствами конкретной соты.

С учетом сказанного выше, основным направлением адаптации технологии LTE к требованиям интегрированных сетей мобильного доступа пятого поколения (5GIN) является переход от фрейма LTE к более мелким частям в сенсорном сегменте интегрированной сети.

Для этих целей, общий ресурс радиоканала LTE должен быть разделен на две части:

- а) штатный канал для обеспечения мобильной связи с типовым набором услуг 4G;
- б) выделенный канал со специальным набором услуг с повышенной частотой переноса данных и сокращенными задержками передачи (обозначим такой канал «ad hoc канал»).

Учитывая структурные особенности фрейма LTE, процесс адаптации технологии LTE к задачам 5GIN целесообразно осуществлять последовательно в два этапа. На первом этапе адаптации цикл переноса информации уменьшается в 10 раз за счет использования подфрейма длительностью 1 мс в качестве информационного блока переноса данных. Этот перенос осуществляется в выделенном логическом канале ad hoc.

На втором этапе адаптации технологии LTE к задачам 5GIN цикл переноса данных дополнительно уменьшается еще в 12 раз (за счет использования отдельных OFDM-символов в качестве протокольных единиц переноса данных в выделенном ad hoc канале).

Рассмотрим детальнее первый этап адаптации технологии LTE к задачам построения интегрированной сети мобильного доступа пятого поколения (5GIN).

Модификацию фрейма LTE для адаптации к задачам передачи данных реального времени с минимизацией задержек выполним следующим образом. Разделим частотный ресурс фрейма LTE, который циркулирует в радиоканале с частотным дуплексом и периодом повторения 10 мс, на две составляющие:

- а) регулярная часть фрейма, в которой длительность цикла переноса данных равна длительности фрейма LTE, т. е. 10 мс (эта часть располагается в центре сетки LTE с поднесущими частотами, близкими к основной несущей частоте DC, рис. 2);

б) выделенная часть фрейма, в которой длительность цикла переноса данных Δt в 10 раз меньше, чем 10 мс ($\Delta t=1$ мс); эта часть фрейма локализуется на краях частотной сетки LTE.

Выполним структуризацию выделенной части частотно-временных ресурсных блоков каждого подфрейма LTE в пакетные транспортные модули (PTM) как показано на рис. 4.

Подфрейм на рис. 4 образован пятнадцатью частотными ресурсными блоками, из которых одиннадцать блоков используются в штатном режиме функционирования LTE (с номерами от «-3» до «+7» в верхней части полуфрейма). Остальные четыре ресурсных блока (с номерами «-1» – «-4» в нижней части полуфрейма) используются для построения выделенного логического канала, который функционирует в специальном режиме ad hoc.

В штатном режиме радиоканала LTE, все десять подфреймов (с номерами от 0 до 9 по горизонтали) образуют единый транспортный модуль нисходящего радиоканала, который имеет длительность 10 мс и частоту повторения 100 Гц. В отличие от штатного режима использования фреймов LTE, нижние четыре частотных ресурсных блока на рис. 4 реорганизованы в десять отдельных пакетных транспортных модулей (PTM) с номерами от 0 до 9. Каждый модуль PTM формируется, передается и воспринимается независимо от других модулей PTM с частотой 1000 Гц и периодом повторения 1 мс.

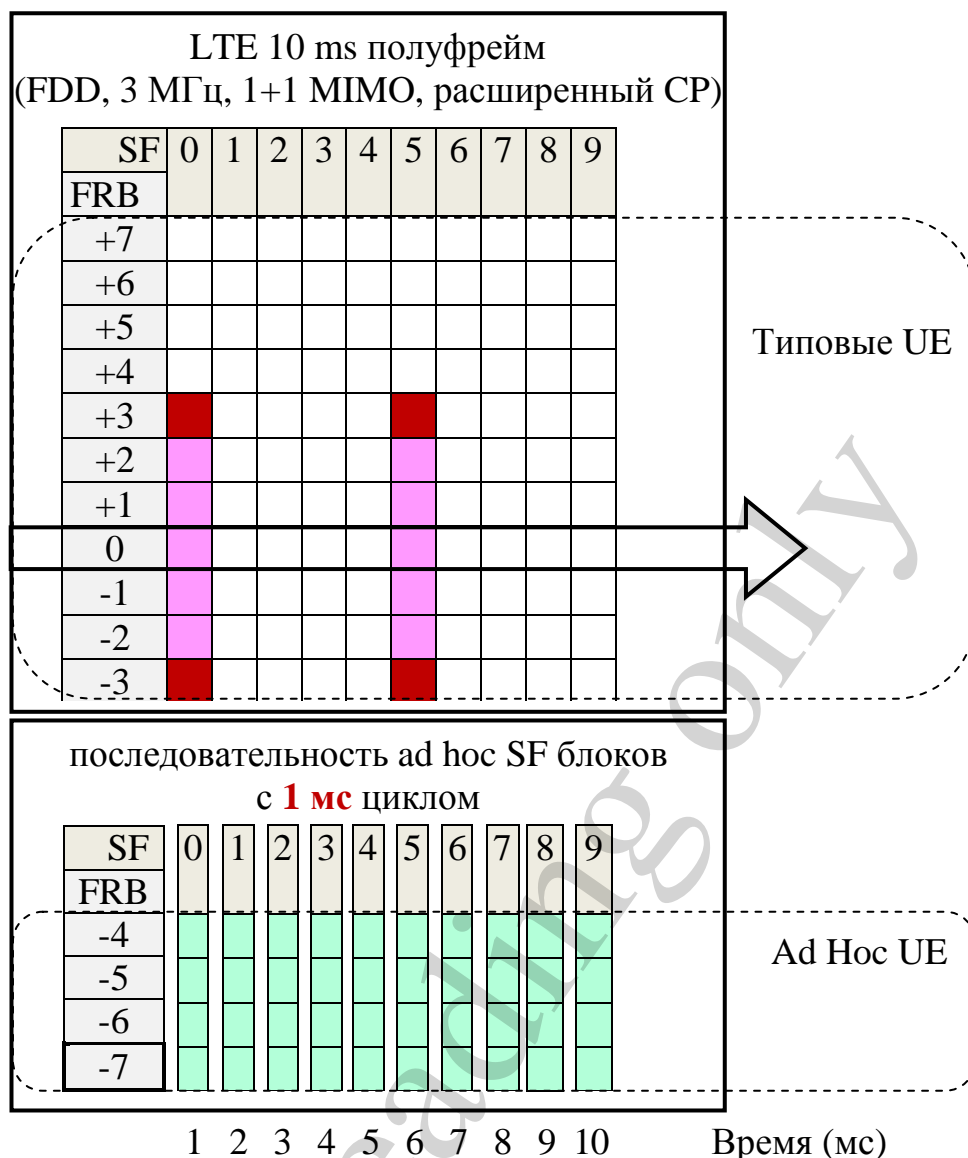


Рис. 4. Принцип объединения частотно-временных ресурсных блоков подфрейма LTE в пакетные транспортные модули

В составе каждого модуля РТМ есть обязательная служебная информация для поддержки синхронизации приемо-передающих устройств базовой станции и мобильных терминальных устройств. Эта информация располагается в тех ячейках сетки LTE на рис. 2, которые выделены различными цветами; «белые» ячейки сетки LTE служат для переноса полезной информации. Таким образом, при передаче информации по выделенному логическому каналу ad hoc, задержка передачи данных составляет одну миллисекунду (т. е. в 10 раз меньше по сравнению с использованием штатного режима радиоканала LTE).

Соотношения между информационной емкостью для регулярной и выделенной части фрейма LTE может динамически изменяться в соответствии с текущими условиями функционирования сети. Этими условиями являются количество терминальных устройств в телефонном и сенсорном сегменте сети, заданный диапазон частот для базовой станции, интенсивность трафика в каждом из двух сегментов интегрированной сети и др.

В рассматриваемом случае структуризации полуфрейма на рис. 4, количество частотных ресурсных блоков, которые могут быть потенциально использованы для построения выделенного логического канала ad hoc, составляет от 1 до 8 из общего числа 15 блоков. Это обусловлено тем, что центральная часть полуфрейма с семью частотными ресурсными блоками от «-3» до «+3» не может использоваться по причине нерегулярной структуры отдельных подфреймов (рис. 2).

6. Разработка архитектуры интегрированной системы мобильного доступа на основе модификации технологии LTE

В терминах семиуровневой модели взаимодействия открытых систем OSI, интегрированная сеть мобильного доступа пятого поколения (5GIN) должна поддерживать нижние шесть уровней, начиная от физического уровня и заканчивая представительским уровнем включительно. На седьмом (прикладном) уровне OSI, в сети 5GIN выделим следующие функциональные типы взаимодействия между объектами сети:

1) Взаимодействия типа P2P (People-to-People) в сегменте “4G Triple Play Segment”, в котором двое или более собеседников ведут диалог в режиме реального времени. Соответствующие клиент/серверные приложения Triple Play реализуются операционными системами конечных устройств.

2) Взаимодействия типа M2M (Machine-to-Machine) в сегменте “Sensor Network Segment”, в котором два или более технических устройства обмениваются между собой информацией в режиме реального времени.

3) Взаимодействия типа P2M (People-to-Machine) – обмен информацией между человеком и техническим устройством через специализированные или типовые устройства, снабженные интерфейсом мобильного доступа.

Системы типа M2M, в которых центральным устройством является управляющий центральный процессор интегрированной сети (CPIN), представляют собой распределенную многоканальную систему автоматического управления; в отличие от M2M, будем обозначать такие системы MCM (Machine-Control-Machine). Динамические свойства систем MCM определяются допустимой скоростью изменения параметров, при которой обеспечивается заданная точность управления и устойчивость системы. Эти характеристики зависят от инерционности объектов и исполняющих устройств, а также от задержки сигналов и команд обратной связи в контуре автоматизированной системы управления (т. е. от циклической задержки CTD).

Циклическая задержка в контуре управления системы MCM исчисляется от момента измерения параметров текущего состояния объекта (например, координат, скорости и ускорения беспилотного автомобиля на транспортной развязке). Далее происходит передача данных телеметрии мобильного объекта через базовую станцию на управляющий процессор. Эти данные обрабатываются совместно с данными от других контролируемых объектов. После этого вырабатываются решения и передаются команды управления на объекты контроля через базовую станцию мобильной связи. Момент получения объектом команды центрального процессора определяет конец циклической задержки.

Рассмотрим функциональные особенности и структурные элементы интегрированной сети доступа пятого поколения 5GIN на примере сети, которая поддерживает мобильную связь 4G и обеспечивает безопасность движения, рис. 5.

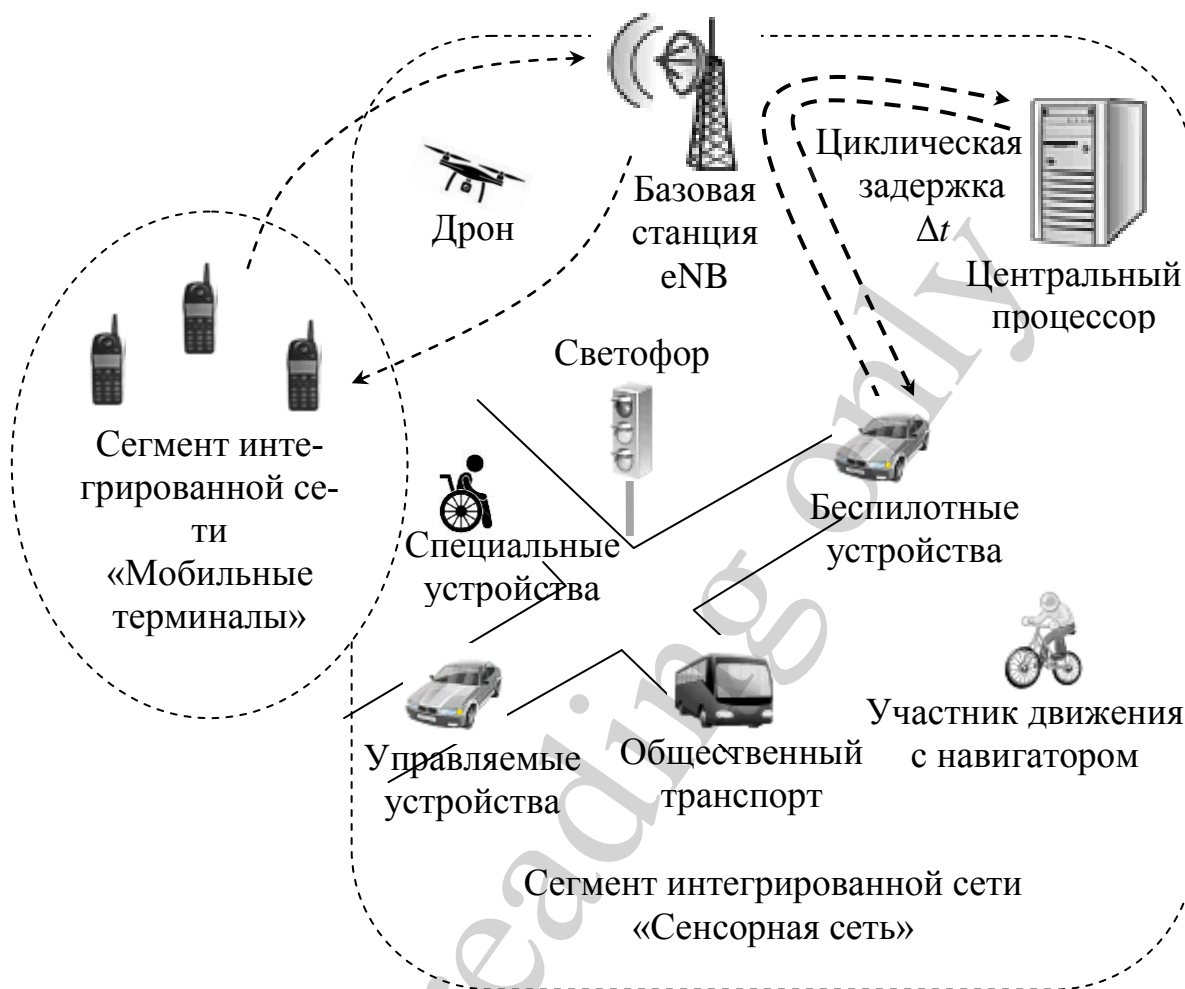


Рис. 5. Интегрированная сеть мобильного доступа 5GIN для контроля безопасности движения

Такого рода сеть объединяет участников движения с центральным процессором CPIN (Central Processor of Integrated mobile Network). Участниками движения могут быть пешеходы с мобильными телефонами, люди с ограниченными возможностями, которые передвигаются с помощью дистанционно контролируемых транспортных средств, велосипедисты с мобильными навигаторами, пилотируемые и беспилотные транспортные средства, общественный транспорт. В терминах системы «клиент-сервер», подобного рода терминальные объекты являются «клиентами» по отношению к сети мобильного доступа 5GIN. Сама сеть мобильного доступа вместе со своей инфраструктурой выступает в качестве «сервера» телекоммуникационных услуг.

Ядром этого типа сервиса является базовая станция с контроллером мобильной сети eNB (evolved Node Base station). В то же время, дополнительным

сервисом прикладного уровня в рассматриваемой сети мобильного доступа 5GIN является контроль и управление безопасностью движения.

Клиентами такого сервиса являются участники движения, а сервером этой услуги выступает CPIN. Интегрированная сеть мобильного доступа 5GIN на рис. 5 содержит два основных сегмента: сегмент 4G и сегмент 5G. Сегмент 4G поддерживает стандартный набор услуг Triple Play; обозначим этот сегмент интегрированной сети как “4G Triple Play Segment” (4G-TPS). Сегмент 5G обслуживает сенсорные объекты с интерфейсом, совместимым с модифицированным радиоканалом технологии LTE; обозначим этот сегмент SNS (Sensor Network Segment). В этом сегменте используется выделенный логический канал ad hoc, в котором передача данных реального времени осуществляется через пакетные транспортные модели PTM. Величина задержки при этом равна 1 мс (т. е. в десять раз меньшей по сравнению со штатным режимом использования радиоканала LTE в сегменте сети мобильной телефонной связи 4G).

Представим обобщенную архитектуру интегрированной сети мобильного доступа пятого поколения (5GIN) на основе модифицированной технологии LTE как объединение двух основных сегментов. Первый сегмент – это обычная сеть 4G; вторая – это сегмент сенсорной сети с улучшенными динамическими свойствами, рис. 6.

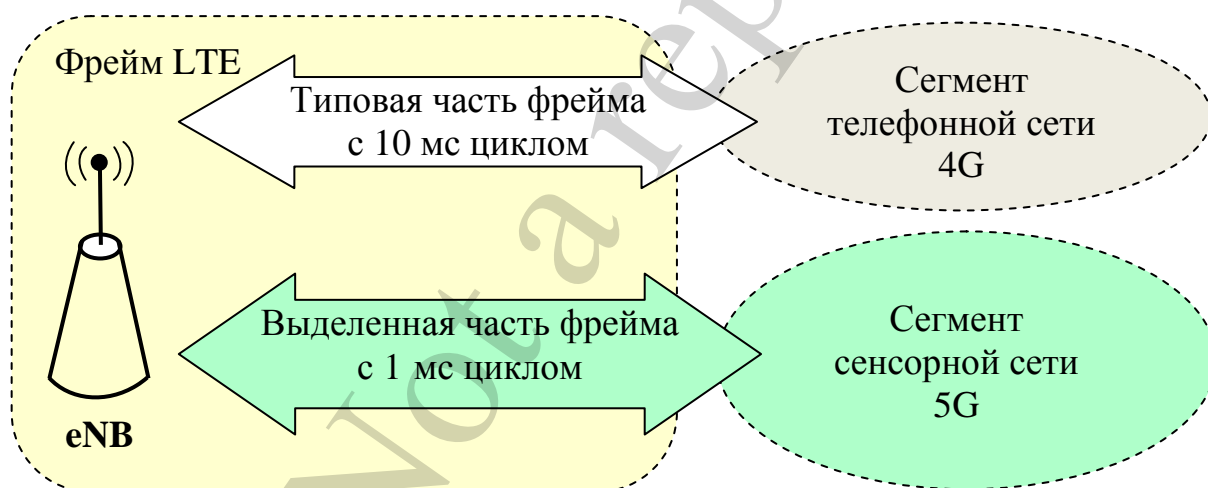


Рис. 6. Общая структура интегрированной сети 5GIN на основе модифицированной технологии LTE

Последовательность пакетных транспортных модулей (PTM) в выделенном логическом канале будем использовать для синхронного и асинхронного мультиплексирования различных типов данных телеметрии для управления сенсорными объектами. Основные принципы решения данной задачи описаны в [18].

Оценим величину циклической задержки передачи сигнала обратной связи в контуре управления, которая может иметь место при взаимодействии сенсорного объекта интегрированной сети (например, беспилотного автомобиля) с центральным процессором CPIN. Будем полагать, что все активные сенсорные объекты в составе интегрированной сети 5GIN, а также центральный процессор сети, синхронизированы с частотой передачи модулей PTM (т. е. с частотой

1 ГГц). Иными словами, в рассматриваемой сети 5GIN время можно условно считать дискретным с минимальным квантом в 1 мс, рис. 7. Цикл передачи сигнала обратной связи в контуре управления включает в себя следующие основные этапы:

- 1) Измерение текущего состояния мобильного объекта по результатам показаний сенсорных датчиков. Интервал времени от начала считывания показаний датчиков до получения результатов оценки локальным контроллером обозначим Δt_0 ;
- 2) Передача результатов измерений по восходящему тракту радиоканала LTE на базовую станцию eNB с задержкой Δt_{UP1} ;
- 3) Обработка информации в узле eNB с задержкой Δt_{C1} ;
- 4) Передача информации по нисходящему тракту радиоканала LTE на центральный процессор CPIN с задержкой Δt_{DW1} ;
- 5) Обработка информации на CPIN с задержкой Δt_{C2} ;
- 6) Передача информации по восходящему тракту радиоканала LTE на базовую станцию eNB с задержкой Δt_{UP2} ;
- 7) Обработка информации в узле eNB с задержкой Δt_{C3} ;
- 8) Передача информации по нисходящему тракту радиоканала LTE на объект с задержкой Δt_{DW2} ;
- 9) Исполнение команды на объекте с задержкой Δt_A .

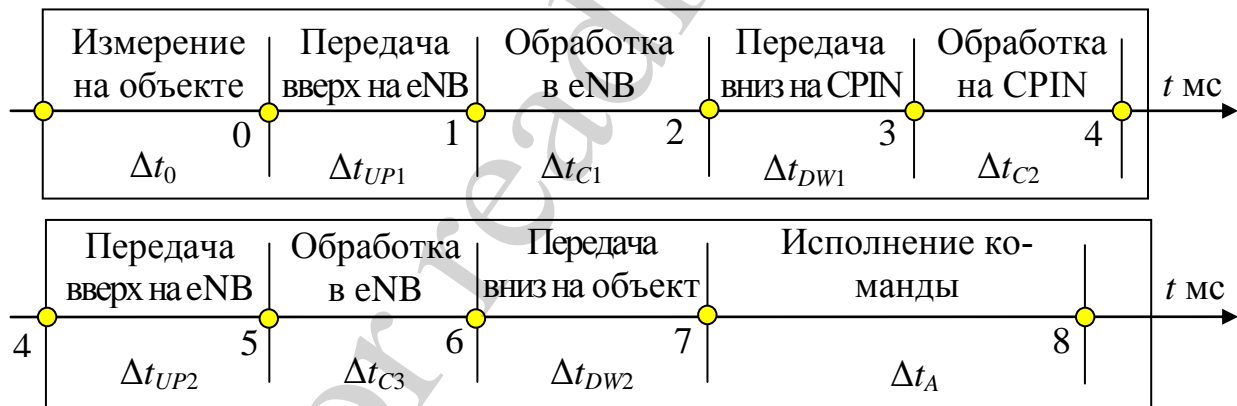


Рис. 7. Временная диаграмма циклической задержки в контуре управления сети 5GIN

Таким образом, общая циклическая задержка в цепи обратной связи контура управления объектом ΔT определяется суммой вида:

$$\Delta T = \Delta t_0 + \Delta t_{UP1} + \Delta t_{C1} + \Delta t_{DW1} + \Delta t_{C2} + \Delta t_{UP2} + \Delta t_{C3} + \Delta t_{DW2} + \Delta t_A. \quad (1)$$

С учетом временных параметров диаграммы на рис. 6, формула (1) принимает вид

$$\Delta T = (\Delta t_0 + 7 + \Delta t_A) \text{ ms.} \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что циклическая задержка в контуре управления CTD превышает 7 циклов задержки переноса информации в радиоканале LTE. Если использовать стандартный канал LTE с циклом переноса 10 мс, то величина CTD составит более 70 мс. За такое время автомобиль, движущийся со скоростью 15 м/с (или 54 км/час) переместится на расстояние около 1 метра, что может оказаться неприемлемым с точки зрения точности беспилотного управления таким автомобилем. Введение канала передачи данных реального времени с циклом переноса в 1 мс уменьшает ошибку в оценке положения автомобиля на такой скорости до величины 0.1 метра.

7. Обсуждение результатов разработки интегрированной системы мобильного доступа

Быстрый рост подключаемых к сети Интернет разнообразных мобильных устройств и постепенное превращение всемирной сети в так называемый «Интернет вещей» ставит новые серьезные задачи по интеграции большого числа абонентов сети с широким диапазоном технических требований к ним. Решение такого рода задач может осуществляться в нескольких направлениях, одним из которых является создание специализированных сетей, функционирующих по специфичным протоколам независимо от общей сети мобильного доступа. Исследования в этом направлении активно проводятся в последние годы. Достоинства специализированных сетей мобильного доступа в их высоком быстродействии и способности решать нестандартные задачи; их недостаток – узкая область применения и сложность взаимодействия с мобильными телефонными сетями общего пользования.

Однако технологии мобильного доступа 4G (в первую очередь, LTE-A) пока что не полностью используют свои потенциальные возможности для интеграции сенсорных объектов в концепции «Интернета вещей». Этот аспект проблемы был рассмотрен в данном исследовании, на основании чего предложена концепция построения интегрированной системы мобильного доступа на основе усовершенствования технологии LTE. Данная работа может рассматриваться как один из первых шагов в указанном направлении. В дальнейшем, в связи с предложенной концепцией, возникают следующие три основные задачи по практической реализации интегрированной сети мобильного доступа пятого поколения.

1) Разработка усовершенствованного протокола для обработки фреймов LTE в контроллере базовой станции eNB, который обеспечивает динамическое распределение частотно-временного ресурса по указанным выше принципам.

2) Разработка метода и алгоритма мультиплексирования данных реального времени с учетом особенностей различных сенсорных объектов интегрированной сети и выполнением требования гарантированного ограничения задержки переноса данных в радиоканале.

3) Разработка предложений по дальнейшему развитию стандартов мобильной связи на основе технологии LTE с учетом выделения отдельного логического канала ad hoc и особенностей передачи данных реального времени через пакетные транспортные модули PTM.

Решение указанных трех задач являются предметом дальнейших исследований в направлении создания интегрированных сетей мобильного доступа пятого поколения на основе модернизации и усовершенствования технологии LTE.

8. Выводы

1. Показано, что физический уровень радиоканала LTE позволяет существенно сократить задержку передачи данных в радиоканале интегрированной сети пятого поколения. Это потребует разработки усовершенствованного метода распределения ресурсов на MAC уровне, а также дальнейшего развития стандарта LTE-A.

2. Предложен способ адаптации радиоканала LTE за счет выделения отдельного логического канала, функционирующего в режиме ad hoc, в котором задержка передачи данных уменьшается в 10 раз по сравнению с типовым режимом. Для реализации канала ad hoc применен метод пакетных транспортных модулей, которые периодически циркулируют в радиоканале с частотой 1 КГц и периодом повторения 1 мс. При этом в канале ad hoc осуществляется синхронное и асинхронное мультиплексирование данных реального времени.

3. На основе адаптации технологии LTE разработана архитектура интегрированной сети мобильного доступа пятого поколения, объединяющая сегмент с набором услуг 4G и сегмент сенсорной сети 5G со специальным набором услуг.

Литература

1. General overview of NGN [Electronic resource]. – ITU-T. – Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2001/en>
2. 4G Wireless Standards [Electronic resource]. – Available at: <https://www3.nd.edu/~mhaenggi/NET/wireless/4G/>
3. What are the 4G Technology Standards [Electronic resource]. – Available at: https://whatsag.com/G/Understanding_4G.php
4. IP Multimedia Subsystem (IMS). 3GPP TS 23.228 V5.15.0 [Electronic resource]. – Available at: <http://www.ttc.or.jp/imt/ts/ts23228rel5v5f0.pdf>
5. Machine-to-Machine communications (M2M). Functional architecture [Electronic resource]. – ETSI TS 102 690 V2.1.1. – Available at: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/102690/02.01.01_60/ts_102690v020101p.pdf
6. Internet of Things Standards Landscaping and Gap Analysis Workshop [Electronic resource]. – Available at: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/internet-things-standards-landscaping-and-gap-analysis-workshop>
7. Long Term Evolution Protocol Overview [Electronic resource]. – Available at: http://www.3g4g.co.uk/Lte/LTE_WP_0810_Freescale.pdf
8. General recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection [Electronic resource]. – ITU-T recommendations

G.114. – 2003. – Available at: <http://studylib.net/doc/18371590/itu-t-rec.-g.114--05-2003%E2%80%94one>

9. The Verizon Wireless 4G LTE Network: Transforming Business with Next-Generation Technology [Electronic resource]. – Verizon. – Available at: <https://www.slideshare.net/CesarMRibeiro/wireless-4g-lte-network-lte-future-mobiletechwp>

10. Vorobiyenko, P. P. The LTE Technology Perspectives in Multimedia Applications [Text] / P. P. Vorobiyenko, V. I. Tikhonov, A. Taher // Digital Technologies. – 2015. – Issue 17. – P. 7–14.

11. Nilsson, J. Real-Time Control Systems with Delays [Text] / J. Nilsson. – Lund, 1998. – 141 p. – Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.30.1570&rep=rep1&type=pdf>

12. Delgado, R. An EtherCAT-based real-time motion control system in mobile robot application [Text] / R. Delgado, S.-Y. Kim, B.-J. You, B.-W. Choi // 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). – 2016. doi: 10.1109/urai.2016.7734098

13. Synnergren, P. LTE latency improvement gains [Electronic resource] / P. Synnergren // ERICSSON. – 2014. – Available at: <https://www.ericsson.com/research-blog/lte-latency-improvement-gains/>

14. Rico-Alvarino, A. An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications [Text] / A. Rico-Alvarino, M. Vajapeyam, H. Xu, X. Wang, Y. Blankenship, J. Bergman et. al. // IEEE Communications Magazine. – 2016. – Vol. 54, Issue 6. – P. 14–21. doi: 10.1109/mcom.2016.7497761

15. Mobile Broadband Transformation LTE To 5G [Text]. – Rysavy Research, 2016. – 198 p. – Available at: http://www.5gamerica.org/files/2214/7257/3276/Final_Mobile_Broadband_Transformation_Rsavy_whitepaper.pdf

16. Wikström, G. LTE latency reduction: preparing for 5G [Electronic resource] / G. Wikström // ERICSSON. – 2016. – Available at: <https://www.ericsson.com/research-blog/lte-latency-reductions-preparing-5g/>

17. Teyeb, O. Evolving LTE to fit the 5G future [Electronic resource] / O. Teyeb, G. Wikström, M. Stattin, T. Cheng, S. Faxér, H. Do // ERICSSON Technology Review. – 2017. – Available at: https://www.ericsson.com/assets/local/publications/ericsson-technology-review/docs/2017/etr_evolving_lte_to_fit_the_5g_future.pdf

18. Tikhonov, V. I. Conveyor module resource scheduling in packet based communication channel [Text] / V. I. Tikhonov, A. Taher, O. V. Tykhonova // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інформатика та моделювання. – 2016. – № 21. – С. 152–161. doi: 10.20998/2411-0558.2016.21.17