

Принципы построения энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет для Арктики

Казак П. Г.*, Шевцов В. А.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: kpavell1616@gmail.com*

***e-mail: vs@mai.ru*

Статья поступила 07.04.2021

Аннотация

Предлагается решение проблемы обеспечения мобильной связи и широкополосного доступа в Интернет для удаленных малонаселенных территорий на примере Арктики. Для этой цели применяются энергоэффективная система сотовой связи с переносом канальной емкости (СПКЕ) с интегрированной системой связи Интернета Вещей LoRaWAN, выполняющей функции управления питанием каждого отдельного сайта в зависимости от наличия абонентов в соте. Такой подход позволяет снизить капитальные и операционные затраты систем сотовой связи в том числе за счет уменьшения энергопотребления, что дает возможность использовать автономные источники питания для сайтов в качестве основных источников питания.

Ключевые слова: мобильная связь, Интернет Вещей, Арктика, система сотовой связи с переносом канальной емкости, Internet of Things, IoT, LoRaWAN, CTR, 4G, LTE, LTE-Advanced, LTE-Advanced-Pro.

Введение

В настоящее время активно осваивается Арктическая Зона Российской Федерации (АЗРФ), для комплексного развития которой необходимо создать доступную для удаленных малонаселенных территорий современную информационно-телекоммуникационную инфраструктуру, способную обеспечить широкополосный доступ (ШПД) в Интернет и мобильную связь [1].

Использование в качестве такой инфраструктуры современных развивающихся систем спутниковой связи («Starlink», «OneWeb» и др.) имеет ряд недостатков [2], таких как большое время задержки на передачу данных абоненту и потребность в использовании дополнительного абонентского оборудования больших габаритов за счет направленных антенн. Пример такого оборудования показан в [3, 4]. С помощью этого оборудования можно организовать только стационарную точку доступа с малой зоной обслуживания [5], что не позволяет реализовать мобильную связь с использованием компактных стандартных абонентских терминалов.

Альтернативой системам спутниковой связи являются разработанные 3GPP системы сотовой связи, которые используют стандарты сотовой связи, обеспечивающие ШПД в Интернет (LTE, LTE-Advanced, LTE-Advanced-Pro). Недостатком таких систем является их нерентабельность в условиях АЗРФ.

На сегодняшний день в качестве одного из способов повышения рентабельности систем сотовой связи уже рассматривалось их интегрирование с самоорганизующимися сетями с динамической структурой Ad-Нос [6, 7, 8].

Предлагается новый способ повышения рентабельности систем сотовой связи в условиях АЗРФ за счет использования энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного ШПД в Интернет, реализованной на основе интеграции системы сотовой связи с переносом канальной емкости (СПКЕ) [9] и одной из энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (Low-power Wide-area Network, LPWAN) [10], представленной в виде системы связи Интернета Вещей LoRaWAN [11].

Функциями системы связи LoRaWAN [12] являются автономный дистанционный мониторинг и управление сайтами, которое включает в себя выключение электропитания сайта при отсутствии абонентов в зоне обслуживания и его включение при появлении абонентов.

Снижение энергопотребления сайта за счет интегрированного оборудования СПКЕ и LoRaWAN, а также предложенный метод управления электропитанием сайтов, позволяет использовать автономные источники питания, например, использующие водород, в качестве основных для обеспечения работоспособности сайтов.

Данная работа посвящена исследованию вариантов реализации и основных принципов работы такой энергоэффективной системы сотовой связи.

Описание энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет

АЗРФ характеризуется суровыми климатическими условиями, отсутствием постоянной энергетической инфраструктуры, а также низкой плотностью населения [13]. Разработанные 3GPP системы сотовой связи имеют высокую стоимость сети радиодоступа (Radio Access Network, RAN), на оборудование которой приходится до 70% капитальных затрат, а на потребляемую этим оборудованием электроэнергию приходится до 50-60% операционных затрат [14, 15]. Отсутствие постоянной энергетической инфраструктуры в АЗРФ также вынуждает использовать автономные источники питания для сайтов, что дополнительно повышает общие затраты. Совокупность этих факторов делает такие системы сотовой связи нерентабельными в условиях АЗРФ, за счет чего они имеют территориально локальный характер.

Для развития современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры в АЗРФ необходимо снизить общие затраты на системы сотовой связи. Снижение капитальных и операционных затрат происходит за счет уже известного оборудования СПКЕ, которое замещает стандартное радиорелейное и сотовое оборудование на каждом сайте, имея при этом более низкое энергопотребление и сохраняя изначальную емкость сети [16, 17]. Ключевой особенностью СПКЕ является возможность работы с современными стандартами сотовой связи 3GPP, обеспечивающими ШПД в интернет (LTE, LTE-Advanced, LTE-A-Pro) и Интернета Вещей (NB-IoT, LTE-M и др.), а также

совместимость с сотовым оборудованием известных производителей (Nokia, ZTE, Huawei, Ericsson и др.) и компактными стандартными абонентскими терминалами (сотовые телефоны и др.), что позволяет использовать СПКЕ не изменяя существующие транспортную сеть и ядро сети [18].

Дополнительное снижение операционных затрат на систему сотовой связи в условиях АЗРФ происходит за счет интеграции оборудования СПКЕ с оборудованием системы связи Интернета Вещей LoRaWAN, выполняющей функции автономной подсистемы дистанционного мониторинга и управления сайтами.

Новым способом снижения операционных затрат является управление электропитанием каждого отдельного сайта при помощи системы связи Интернета Вещей LoRaWAN, а именно отключение электропитания приемо-передатчика СПКЕ в случае «холостой» работы, т.е. когда в его зоне обслуживания нет абонентов, и включение электропитания при их появлении. Реализация такого подхода позволит сократить затраты на обслуживание подсистемы электропитания, в том числе за счет уменьшения числа выездов для подвоза топлива для автономных ИП отдельных сайтов.

Основным способом обеспечения электропитания сайта вдали от постоянной энергетической инфраструктуры является использование генераторной установки в связке с аккумуляторной батареей. За счет общего сокращения потребления электроэнергии сайта становится возможным использовать альтернативные ИП (ветренные или солнечные генераторные установки), которые по сравнению с дизельными генераторными установками требуют меньше операционных затрат,

связанных с подвозом топлива. Тем не менее, использование ветренных и солнечных генераторных установок крайне сильно зависит от природных условий, вследствие чего можно недополучить требуемую электроэнергию [19, 20]. Вследствие этого, предлагается использовать источники питания, использующие водород [21], которые в значительно меньшей степени зависимы от природных условий, требуют меньше операционных расходов, по сравнению с дизельными генераторными установками, а также способны обеспечить большое время автономной работы.

Варианты реализации энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет

Предлагаются несколько вариантов реализации энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет в условиях АЗРФ на основе интеграции СПКЕ и системы связи LoRaWAN.

Первый вариант интеграции основан на использовании отдельного оборудования двух систем и представлен на рисунке 1. В этом случае шлюз (Gateway, GW) LoRaWAN, который является IP-устройством [22], находится на одном сайте с оборудованием СПКЕ и управляет его электропитанием, заставляя включать или выключать приемопередатчик в зависимости от наличия абонентов в зоне обслуживания.

Взаимодействие GW LoRaWAN и СПКЕ происходит при помощи радиоканала LTE или технологии Ethernet, что позволяет использовать встроенную радиорелейную линию СПКЕ для связи с сервером LoRaWAN.

Электропитание GW LoRaWAN осуществляется с помощью технологии передачи электроэнергии через Ethernet-кабель, также известной как Power over Ethernet (PoE), или при помощи отдельного ИП. Дополнительно предусмотрен аварийный ИП (АИП) для сохранения работоспособности GW LoRaWAN и радиорелейной линии СПКЕ в случае, если основной ИП выйдет из строя.

На рисунке 1 показана цепочка переноса емкости в одном направлении от БС, в которой участвуют три сайта с CTR и GW LoRaWAN. Для формирования зоны обслуживания на каждом сайте используется по одному приемо-передатчику для CTR и GW LoRaWAN, которые обозначены как TRx и TRxGW соответственно. В зависимости от потребностей, число приемо-передатчиков можно увеличить.

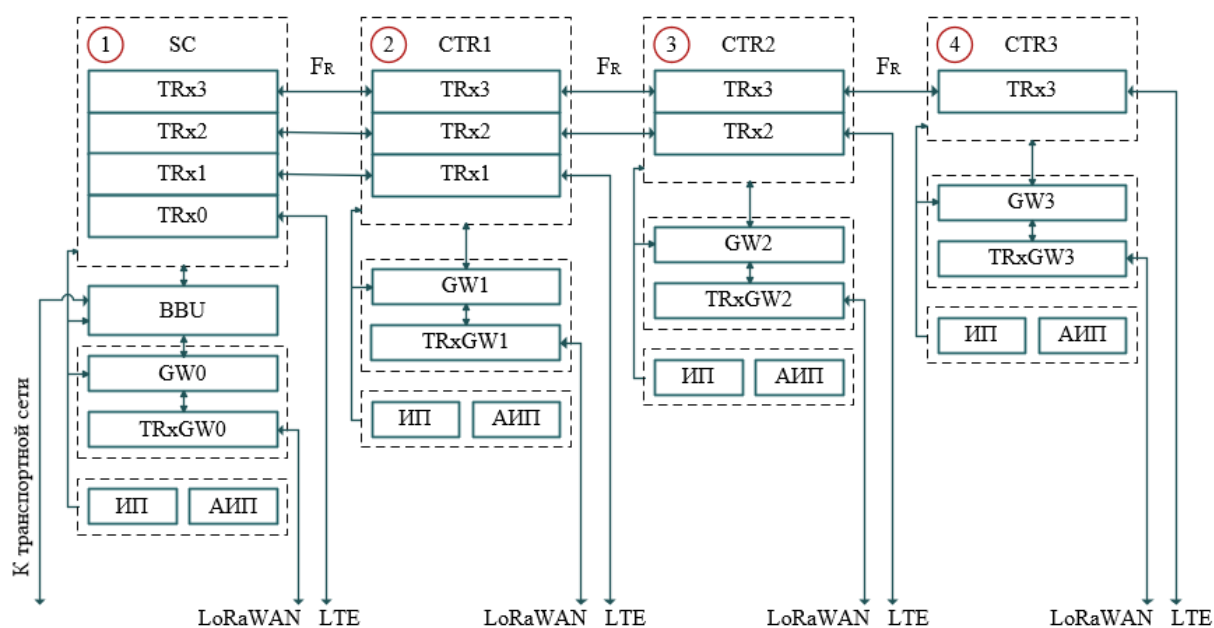


Рисунок 1 – Структурная схема RAN системы сотовой связи на основе интеграции СПКЕ и системы связи LoRaWAN

Данный вариант реализации показан на примере распределенных БС, состоящих из блока базовых сигналов (Baseband Unit, BBU) и выносного радиоблока

(Radio Remote Unit, RRU). На первом сайте цепочки переноса емкости расположен BBU, емкость которого передается на CTR, располагающихся на последующих сайтах. CTR заменяют RRU, сохраняя при этом прежнюю емкость сети.

К BBU подключена совместимая с ним малая БС, известная также как Small Cell (SC), которая является стандартным оборудованием известных производителей (Nokia, ZTE, Huawei, Ericsson и др.). SC формирует вокруг первого сайта зону обслуживания одного из стандартов сотовой связи, обеспечивающего ШПД в Интернет (например, LTE), а также переносит емкость BBU на частоты F_R и передает ее на последующие в цепочке ретрансляции сайты. Частоты F_R соответствуют, например, выделяемым для радиорелейных линий, и отличаются от рабочих частот LTE и LoRaWAN, предназначенных абонентам.

Расположенный на сайте GW LoRaWAN подключен к BBU и выполняет функции мониторинга и управления электропитанием приемо-передатчика SC, формирующего зону обслуживания LTE. Формируемая GW LoRaWAN зона обслуживания превышает зону обслуживания LTE, что позволяет выключать приемо-передатчик LTE в случае, когда рядом нет абонентов, и заблаговременно включать его до того, как абонент попал в зону обслуживания LTE. Расположенные на последующих сайтах GW LoRaWAN подключены к CTR и выполняют аналогичные функции.

На втором сайте в цепочке переноса емкости установлен CTR1, который имеет три приемо-передатчика, один из которых формирует зону обслуживания LTE на частоте, предназначенной для абонентов, а оставшиеся два переносят принятый от

первого сайта сигнал на другие номиналы частот F_R , продолжая цепочку переноса емкости.

На третьем сайте установлен CTR2 с двумя приемо-передатчиками, один из которых формирует зону обслуживания LTE, а другой обеспечивает перенос принятого сигнала от второго сайта на новые номиналы частот F_R далее к четвертому сайту. Замыкает цепочку переноса емкости CTR3, расположенный на четвертом сайте, который имеет всего один приемо-передатчик, образующий зону обслуживания LTE.

При выходе из строя основного ИП на каждом сайте предусмотрен АИП. В этом случае CTR прекращает формировать зону обслуживания LTE и служит только для обеспечения работоспособности встроенной радиорелейной линии CTR и GW LoRaWAN, который в свою очередь передает информацию об этом событии на сервер.

При отсутствии у SC возможности переноса сигналов BBU на частоты F_R используется дополнительный блок конвертера частот (Radio Frequency Converter, RFC), переносящий номиналы предназначенных абонентам частот на частоты F_R . RFC подключается к антенным разъемам SC, что показано на рисунке 2.

Второй вариант реализации, показанный на рисунке 3, основан на использовании нового оборудования, представляющего собой интеграцию CTR и GW LoRaWAN в одном устройстве. На первом сайте расположены BBU и SC известных производителей, а зона обслуживания LoRaWAN формируется за счет отдельного

GW LoRaWAN, который взаимодействует с BBU. Вариант с дополнительным блоком RFC показан на рисунке 4.

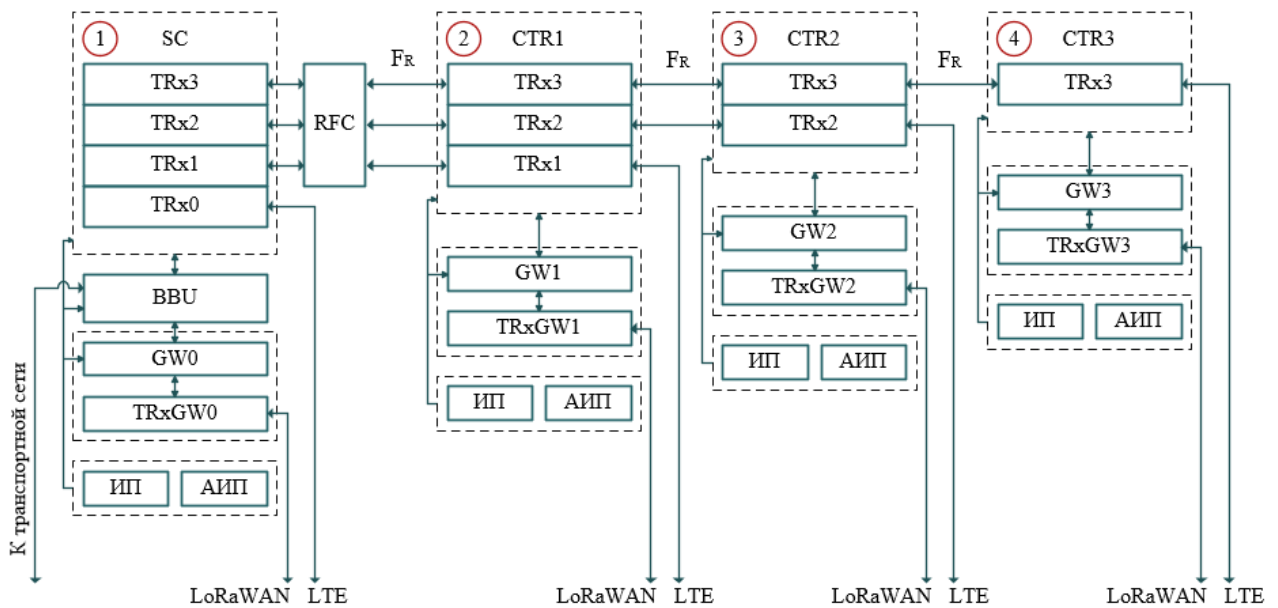


Рисунок 2 – Структурная схема RAN системы сотовой связи на основе интеграции СПКЕ и системы связи LoRaWAN с использованием дополнительного блока RFC

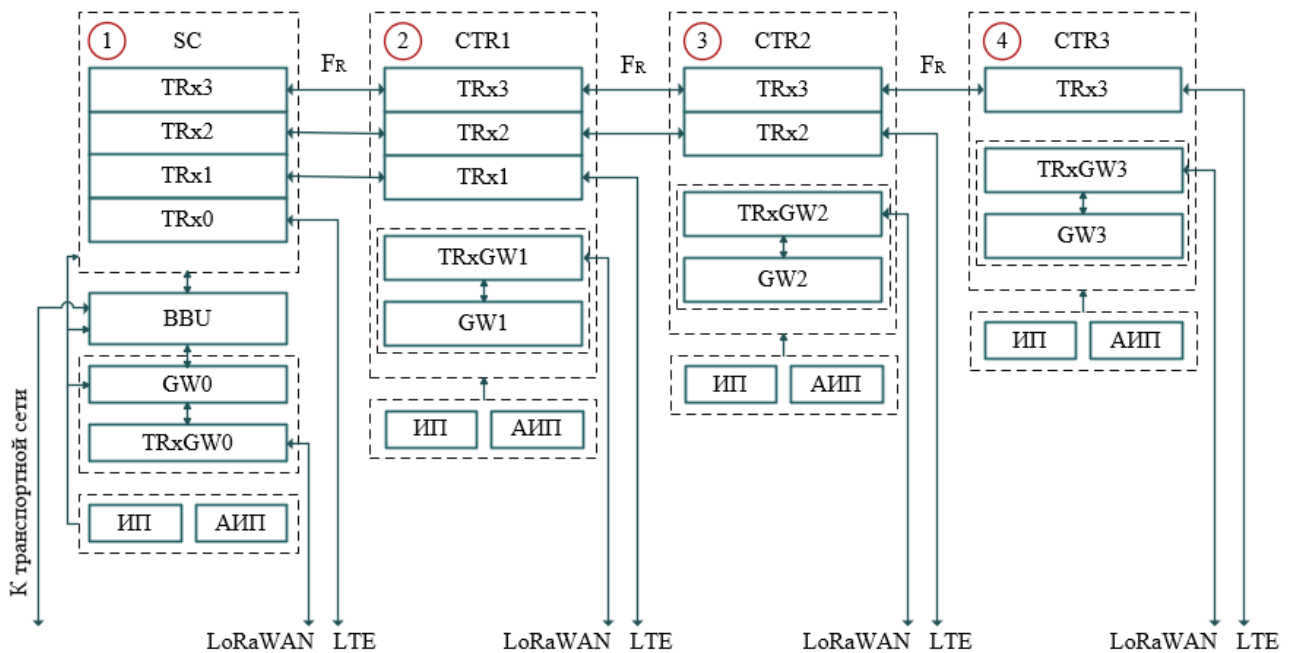


Рисунок 3 – Структурная схема RAN системы сотовой связи на основе интеграции функций СПКЕ и системы связи LoRaWAN в одном устройстве

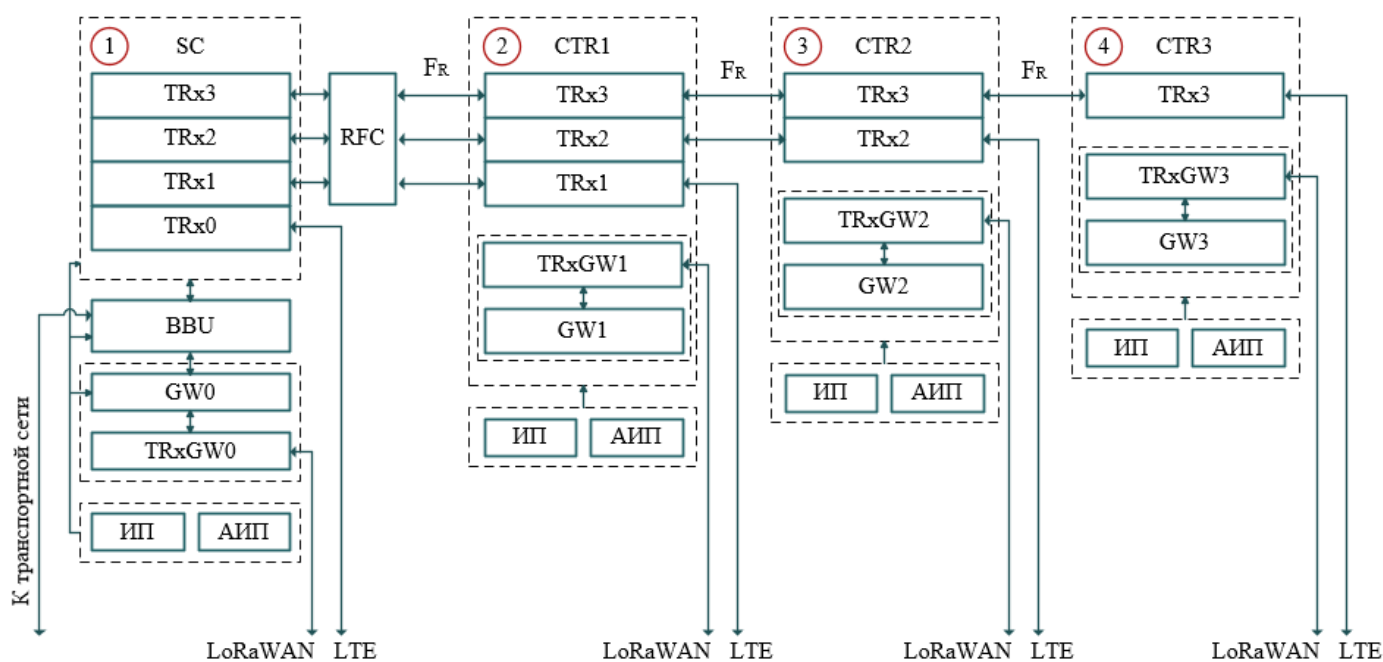


Рисунок 4 – Структурная схема RAN системы сотовой связи на основе интеграции функций СПКЕ и системы связи LoRaWAN в одном устройстве при использовании дополнительного блока RFC

В третьем варианте реализации, представленном на рисунке 5, отсутствует необходимость отдельного GW LoRaWAN на сайте с BBU. В этом варианте SC заменен на новое устройство ретрансляции сигналов BBU (BBU Repeater, BBU-R), который выполняет одновременно функции переноса емкости BBU на последующие сайты в цепочке переноса емкости на частоте F_R , обеспечивает зону обслуживания LTE, а также является GW LoRaWAN с соответствующей зоной обслуживания, формируемой при помощи дополнительного приемо-передатчика.

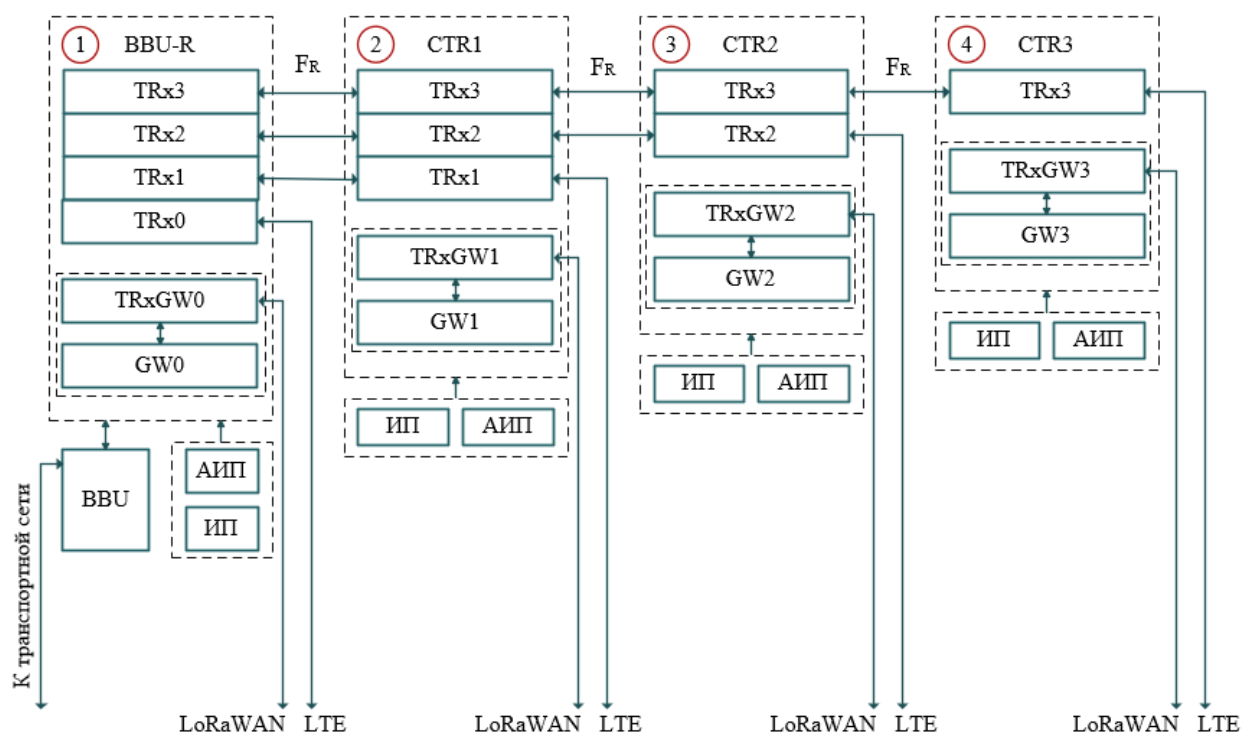


Рисунок 5 – Структурная схема RAN системы сотовой связи на основе интеграции СПКЕ и системы связи LoRaWAN в одном устройстве при использовании дополнительного устройства BBU-R

Реализуя один из вариантов такой энергоэффективной системы сотовой связи при помощи одной цепочки переноса емкости возможно обеспечить сплошную линейную зону обслуживания вдоль автомобильных и железных дорог или же вдоль морского побережья АЗРФ, что будет способствовать, например, улучшению навигации по Северному Морскому Пути. Подобную сплошную линейную зону обслуживания можно организовать в том числе при помощи двух цепочек переноса емкости, направленных в противоположные стороны от БС, что позволит заменить шесть БС на шесть CTR с интегрированным GW LoRaWAN. В общем случае, в

цепочке переноса емкости может быть как большее, так и меньшее число CTR с интегрированным GW LoRaWAN.

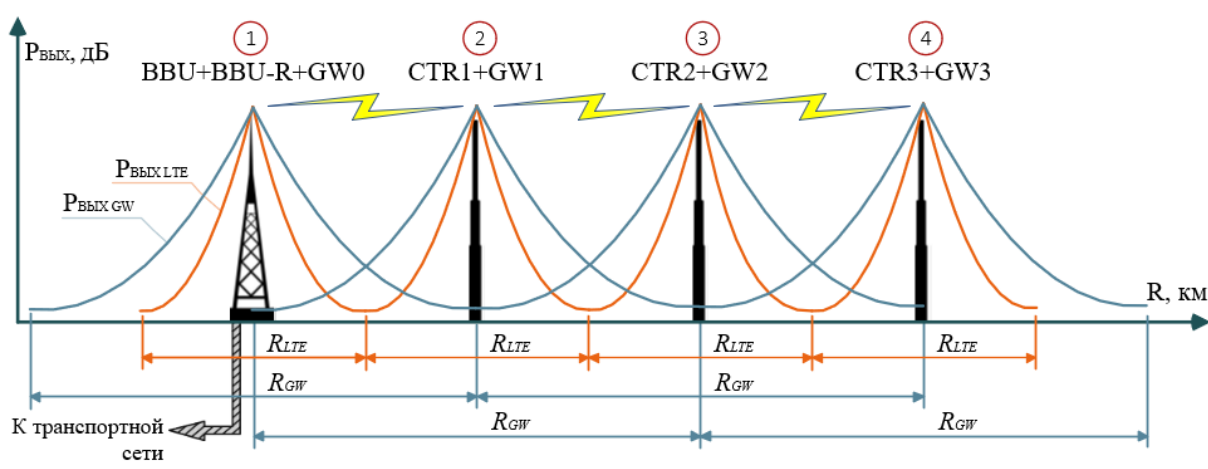


Рисунок 6 – Линейная зона обслуживания системы сотовой связи на основе интеграции СПКЕ и системы связи LoRaWAN

Хэндовер в энергоэффективной системе сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет

В данной энергоэффективной системе сотовой связи реализуется процедура хэндовера, что показано на рисунках 7-9 на примере цепочки переноса емкости в одном направлении. В данной цепочке все время активны BBU и встроенная радиорелейная линия СПКЕ.

На рисунке 7 изначально мобильная станция (МС) расположена в зоне обслуживания GW3 , который располагается на последнем сайте в цепочке переноса емкости вместе с CTR3 и управляет электропитанием его прямо-передатчика. Зона обслуживания LoRaWAN, которая формируется GW, больше зоны обслуживания LTE, формируемой CTR, благодаря чему соты LoRaWAN несколько перекрывают

друг друга. Поскольку МС находится в зоне обслуживания LoRaWAN, GW3 включает электропитание приемо-передатчика CTR3, заставляя его тем самым формировать зону обслуживания LTE до того, как МС попадет в нее, что отображено на рисунке 7.

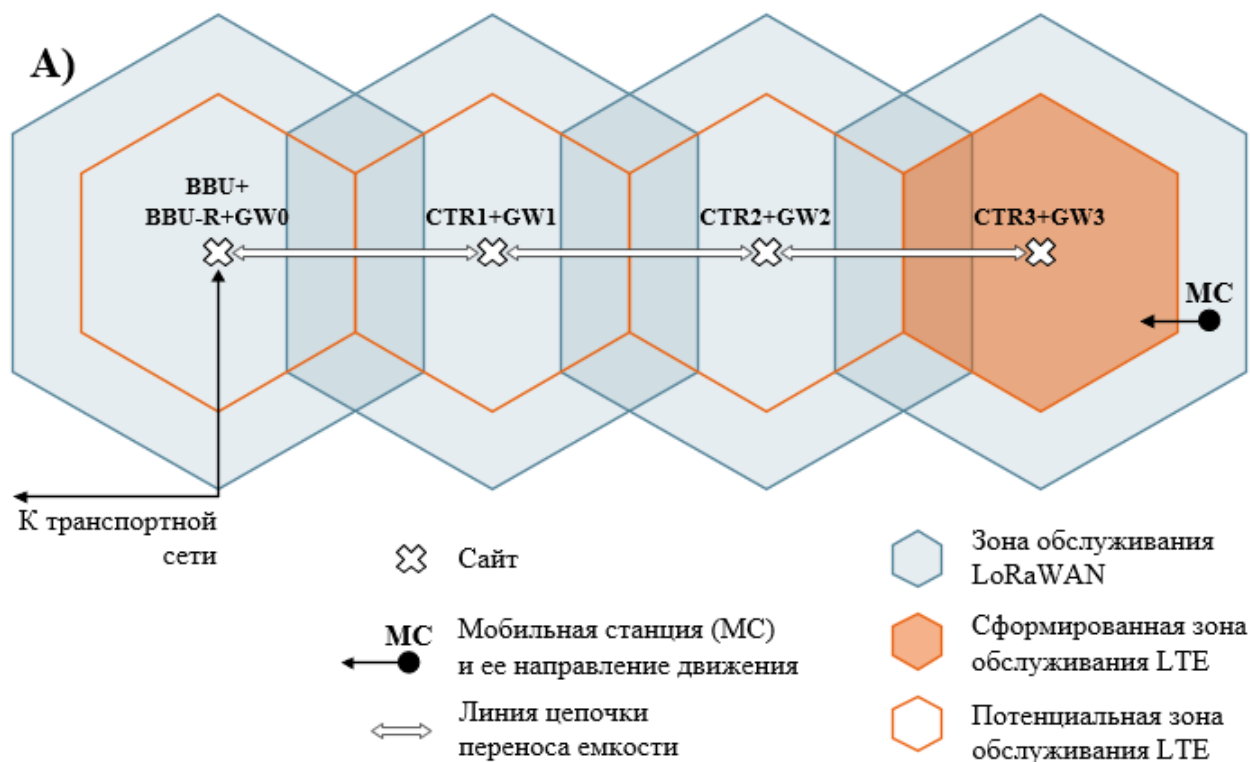


Рисунок 7 – Хэндовер в энергоэффективной системе сотовой связи на основе интеграции СПКЕ и системы связи LoRaWAN, часть 1

При дальнейшем движении МС попадает в зону обслуживания GW2, оставаясь при этом в зоне обслуживания GW3 (рисунок 8). В этот момент GW2 включает электропитание приемо-передатчика CTR2, заставляя формировать зону обслуживания LTE до того, как МС попадет в нее, тем самым обеспечивая хэндовер в энергоэффективной системе сотовой связи.

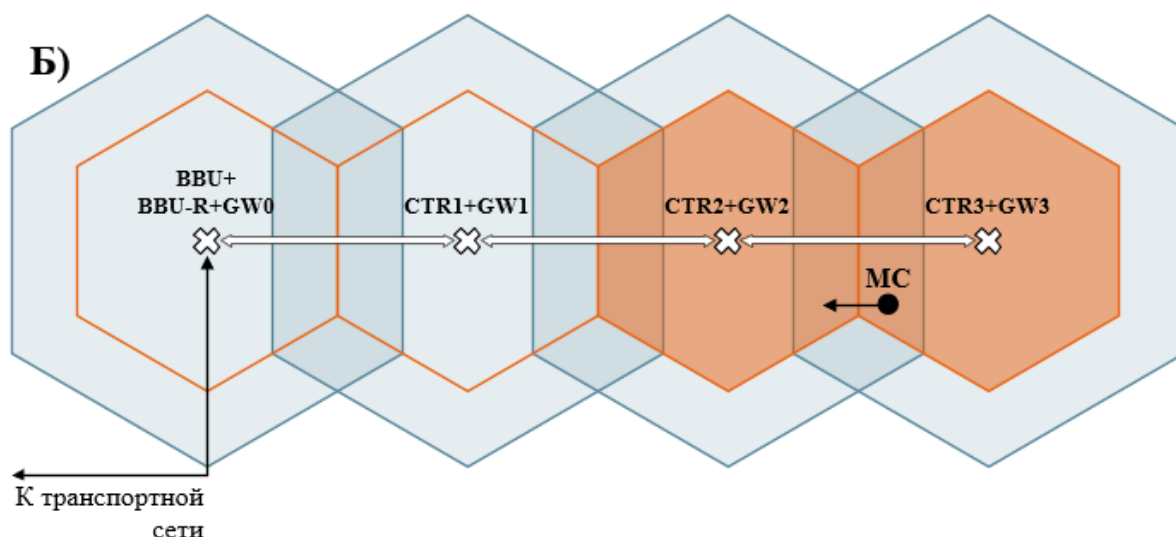


Рисунок 8 – Хэндовер в энергоэффективной системе сотовой связи на основе интеграции СПКЕ и системы связи LoRaWAN, часть 2

Продолжая движение, МС покидает зону обслуживания GW3 LoRaWAN, после чего CTR3 прекращает формировать зону обслуживания LTE, что показано на рисунке 9. Данный принцип хэндовера справедлив для всех сайтов в цепочке переноса емкости.

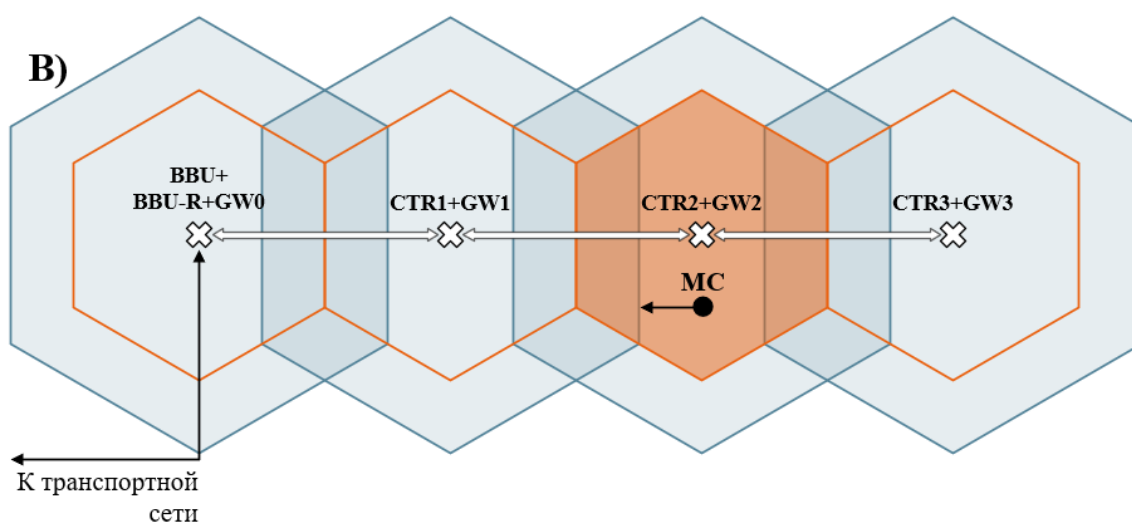


Рисунок 9 – Хэндовер в энергоэффективной системе сотовой связи на основе интеграции СПКЕ и системы связи LoRaWAN, часть 3

Организация сплошной зоны обслуживания, например, в населенных пунктах, осуществляется при помощи нескольких цепочек переноса емкости, организованных в необходимых направлениях. Пример сплошной зоны обслуживания энергоэффективной системы сотовой связи, в котором вместо стандартного сотового оборудования используются 18 CTR и GW LoRaWAN, показан на рисунке 10.

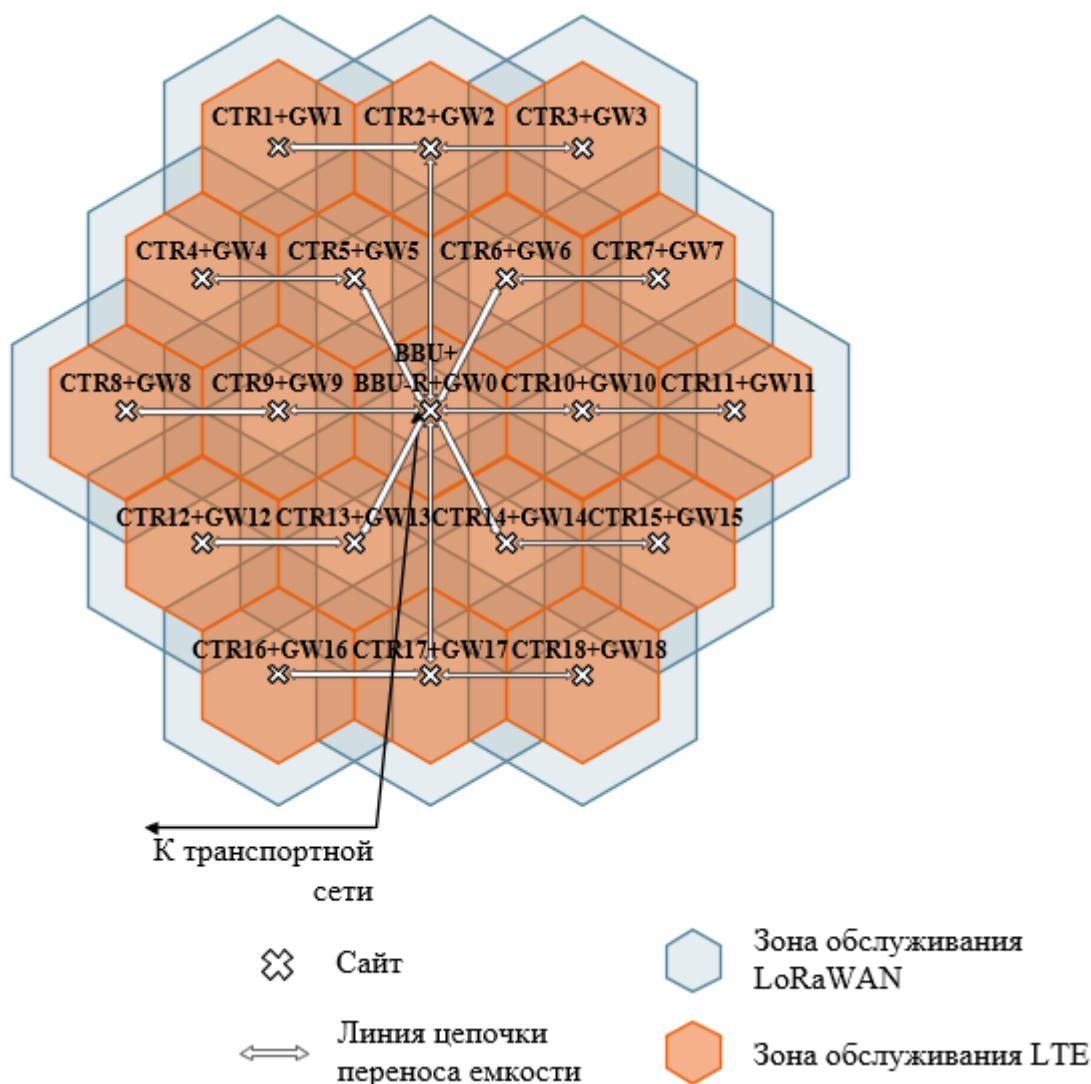


Рисунок 10 – Сплошная зона обслуживания энергоэффективной системы сотовой связи на основе интеграции СПКЕ и LoRaWAN для населенных пунктов

Заключение

В данной работе показано три варианта реализации энергоэффективной системы сотовой связи на основе интеграции СПКЕ и системы связи Интернета Вещей LoRaWAN. В первом варианте используется отдельное оборудование СПКЕ и LoRaWAN, что позволяет реализовать энергоэффективную систему сотовой связи на оборудовании, которое в данный момент присутствует на рынке, в том числе на оборудовании отечественного производителя. Второй вариант предлагает использование на сайтах цепочки переноса емкости нового оборудования, в котором функционал СПКЕ и LoRaWAN объединен в одном устройстве. Третий вариант реализации представляет собой расширенный второй вариант, в котором дополнительно SC и GW LoRaWAN на сайте с BBU объединены в одно новое устройство.

Помимо снижения капитальных затрат за счет использования оборудования СПКЕ, реализация подобной энергоэффективной системы сотовой связи также позволит снизить операционные затраты за счет управления электропитанием сайтов путем включения и отключения приемо-передатчиков СПКЕ в зависимости от нахождения абонента в их зоне обслуживания. За счет этого повышается рентабельность систем сотовой связи для удаленных малонаселенных территорий, включая Арктику.

В работе рассмотрен принцип хэндовера в подобной энергоэффективной системе сотовой связи, а также показан пример организации сплошной зоны обслуживания с помощью такой системы.

Библиографический список

1. Указ Президента Российской Федерации от 05.03.2020г № 164 «Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года». URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/f8ZpjhpAaQ0WB1zjywN04OgKiI1mAvaM.pdf>
2. Бахтин А.А., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю. Анализ современных возможностей организации сверхвысокоскоростных спутниковых радиолиний // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85828>
3. Starlink. URL: <https://www.starlink.com/>
4. OneWeb. URL: <https://www.oneweb.world/>
5. Первые впечатления от спутникового интернета Starlink. URL: <https://3dnews.ru/1024391/pervie-vpechatleniya-ot-sputnikovogo-interneta-starlink-komfortnie-skorost-i-zadergka-prostaya-ustanovkaoborudovaniya>
6. Шевцов В.А., Бородин В.В., Крылов М.А. Построение совмещенной сети сотовой связи и самоорганизующейся сети с динамической структурой // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66417>
7. Бахтин А.А., Волков А.С., Баскаков А.Е. Исследование особенностей реализации алгоритмов доступа к среде в мобильных самоорганизующихся сетях связи // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87331>

8. Волков А.С., Муратчаев С.С., Кульпина Ю.А. Разработка имитационной модели двухранговой сети MANET // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111387>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-13](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-13)
9. ITU-T Recommendation L.1700 – Supplement 30. Setting up a low-cost sustainable telecommunication network for rural communications in developing countries using cellular network with capacity transfer, 14.10.2016. URL: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=12885>
10. LPWAN и другие беспроводные технологии. URL: https://controlengrussia.com/internet-veshhej/lpwan_iot/
11. Ericsson White Paper. Cellular Networks for Massive IoT. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/cellular-networks-for-massive-iot-enabling-low-power-wide-area-applications>
12. Semtech LoRa Technology Overview. URL: <https://www.semtech.com/lora>
13. Фаузер В.В., Лыткина Т.С., Смирнов А.В. Дифференциация арктических территорий по степени заселенности и экономической освоенности // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4 (28). С. 18 – 31.
14. Как избавиться от вендорной зависимости. URL: <https://www.rspectr.com/articles/491/kak-izbavitsya-ot-vendornoj-zavisimosti>
15. Емельянов А.К. Пути повышения энергоэффективности подсистемы базовых станций сетей сотовой связи // Наукоедение. 2013. № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/30evn413.pdf>.
16. Громаков Ю.А. Система сотовой связи и ее узлы. Патент RU 2279764 С 1. Бюлл.

№ 19, 10.07.2006.

17. Громаков Ю.А. Система сотовой связи с переносом канальной емкости. Патент RU 2630420 С 1. Бюлл. № 25, 07.09.2017.

18. Громаков Ю.А. Система сотовой связи с переносом емкости // Электросвязь. 2013. № 11. С. 38 - 41.

19. Репортаж: базовая станция на солнечных батареях. URL: <https://habr.com/ru/company/megafon/blog/241365/>

20. Зеленая энергетика для базовых станций. URL: <https://habr.com/ru/company/croc/blog/254043/>

21. Водородная энергетика. URL: <https://energy.hse.ru/hydrenergy>

22. Gateways / Ecosystem / Semtech LoRa Technology. URL: <https://www.semtech.com/lora/ecosystem/gateways>

Principles of design an energy-efficient cellular communication system and wireless broadband Internet access for the Arctic

Kazak P.G.*, Shevtsov V.A.**

*Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

**e-mail: kpavell1616@gmail.com*

***e-mail: vs@mai.ru*

Abstract

Currently, the Arctic territories of Russia are actively developing. For integrated development it's necessary to create a modern telecommunications infrastructure accessible to remote sparsely populated areas which is capable of providing broadband Internet access and mobile communications.

The use of modern developing satellite communication systems ("Starlink", "OneWeb", etc.) as such an infrastructure has a number of disadvantages: a long delay time for data transmission to a user and the need to use additional user equipment of large dimensions due to directional antennas. With the help of such equipment, it's possible to organize only a stationary access point with a small service area which doesn't allow the implementation of mobile communication using compact standard user equipment.

An alternative to satellite communication systems are cellular communication systems developed by 3GPP, which use cellular communication standards that provide broadband Internet access (LTE, LTE-Advanced, LTE-Advanced-Pro). The disadvantage of such systems is their unprofitability in the Arctic.

To date, integration with self-organizing networks with a dynamic Ad-Hoc structure has already been considered as one of the ways to increase the profitability of cellular communication systems.

A new way of increasing the profitability of cellular communication systems in the Arctic is proposed. For this, cellular communication systems with capacity transfer, integrated with the Internet of Things LoRaWAN communication system are used.

The functions of the LoRaWAN communication system [12] are autonomous remote monitoring and site management which includes turning off the power supply of the site when there are no subscribers in the service area and turning it on when subscribers appear.

Reducing the energy consumption of the site due to the integrated equipment of cellular communication systems with capacity transfer and LoRaWAN communication system, as well as the proposed method for managing the power supply of sites allows the use of autonomous power sources, for example, using hydrogen, as the main ones to ensure the operability of sites.

This work is devoted to the study of implementation options and basic principles of operation of energy-efficient cellular communication systems with capacity transfer integrated with the Internet of Things LoRaWAN communication system.

Keywords: mobile communications, sparsely populated areas, Arctic, Internet of Things, IoT, LoRaWAN, cellular network with capacity transfer, 4G, LTE, LTE-Advanced, LTE-Advanced-Pro

References

1. *Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 05.03.2020g № 164 «Ob osnovakh gosudarstvennoi politiki Rossiiskoi Federatsii v Arktike na period do 2035 goda»* (Decree of the President of the Russian Federation "On the fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035"). URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/f8ZpjhpAaQ0WB1zjywN04OgKiI1mAvaM.pdf>
2. Bakhtin A.A., Omel'yanchuk E.V., Semenova A.Yu. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85828>
3. *Starlink*. URL: <https://www.starlink.com/>
4. *OneWeb*. URL: <https://www.oneweb.world/>
5. *Pervye vpechatleniya ot sputnikovogo interneta Starlink*. URL: <https://3dnews.ru/1024391/pervie-vpechatleniya-ot-sputnikovogo-interneta-starlink-komfortnie-skorost-i-zadergka-prostaya-ustanovkaoborudovaniya>
6. Shevtsov V.A., Borodin V.V., Krylov M.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66417>
7. Bakhtin A.A., Volkov A.S., Baskakov A.E. *Trudy MAI*, 2017, no. 97. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87331>
8. Volkov A.S., Muratchaev S.S., Kul'pina Yu.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111387>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-13](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-13)
9. *ITU-T Recommendation L.1700 – Supplement 30. Setting up a low-cost sustainable telecommunication network for rural communications in developing countries using*

cellular network with capacity transfer, 14.10.2016. URL: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=12885>

10. *LPWAN i drugie besprovodnye tekhnologii*. URL: https://controlengrussia.com/internet-veshhej/lpwan_iot/

11. *Ericsson White Paper. Cellular Networks for Massive IoT*. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/cellular-networks-for-massive-iot--enabling-low-power-wide-area-applications>

12. *Semtech LoRa Technology Overview*. URL: <https://www.semtech.com/lora>

13. Fauzer V.V., Lytkina T.S., Smirnov A.V. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2017, no. 4 (28), pp. 18 – 31.

14. *Kak izbavit'sya ot vendornoj zavisimosti*. URL: <https://www.rspectr.com/articles/491/kak-izbavitsya-ot-vendornoj-zavisimosti>

15. Emel'yanov A.K. *Naukovedenie*, 2013, no 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/30evn413.pdf>

16. Gromakov Yu.A. *Patent RU 2279764 C 1*, 10.07.2006.

17. Gromakov Yu.A. *Patent RU 2630420 C 1*, 07.09.2017.

18. Gromakov Yu.A. *Elektrosvyaz'*, 2013, no. 11, pp. 38 - 41.

19. *Reportazh: bazovaya stantsiya na solnechnykh batareyakh*. URL: <https://habr.com/ru/company/megafon/blog/241365/>

20. *Zelenaya energetika dlya bazovykh stantsii*, URL: <https://habr.com/ru/company/croc/blog/254043/>

21. *Vodorodnaya energetika*. URL: <https://energy.hse.ru/hydrenergy>

22. *Gateways / Ecosystem / Semtech LoRa Technology.* URL:

<https://www.semtech.com/lora/ecosystem/gateways>