

# ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ РАБОТНИКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В статье решается задача выбора технологии беспроводной передачи данных для системы контроля местоположения сотрудников в опасных зонах на железнодорожном транспорте. Рассматриваются такие технологии как Zigbee, Wi-Fi, Wi-Max, GSM/GPRS, 3G/4G/5G и LoRa, анализируются их достоинства и недостатки, для чего оцениваются способы модуляции каждой из них.

**Ключевые слова:** Zigbee, Wi-Fi, Wi-Max, GSM/GPRS, 3G/4G/5G, LoRa, технология беспроводной передачи данных

EDN: QQRCQY



М.Э. Скоробогатов



А.В. Пультяков

Задача контроля местоположения сотрудников в рабочее время, особенно с разъездным характером работы, является актуальной и ставится во многих сферах хозяйственной деятельности. Для этих целей широко применяются мобильные средства с функцией геолокации, которые достаточно хорошо работают в густонаселенных районах и непосредственно в населенных пунктах [1;2].

Железнодорожный транспорт является зоной повышенной опасности, связанной с движением поездов. Железнодорожная сеть имеет территориально-распределенную структуру с большим количеством участков, расположенных вдали от населенных пунктов,

а также в горнопересеченной местности со слабым или отсутствующим сигналом сотовой связи, т.е. без мобильной связи.

## Постановка задачи

При проведении работ по технической эксплуатации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, находящихся в удаленных и опасных зонах, требуются контроль местоположения работников. Для решения данной задачи предлагается разрабатываемая автоматизированная система контроля местонахождения работников железнодорожного транспорта.

**Скоробогатов Максим Эдуардович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Область научных интересов: автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, повышение эффективности технической эксплуатации устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Автор 31 научной работы, в том числе одного учебно-методического издания. Имеет пять патентов на изобретения.

**Пультяков Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Область научных интересов: автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, повышение эффективности технической эксплуатации устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Автор 110 научных работ, в том числе одной монографии, пяти учебных пособий и шести учебно-методических изданий. Имеет 21 патент на полезные модели и изобретения, четыре свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

**Козиенко Леонид Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Область научных интересов: спутниковые радионавигационные системы (GPS, ГЛОНАСС), телекоммуникационные системы и сети передачи данных, волоконно-оптические системы передачи. Автор 53 научных работ, в том числе трех учебных пособий. Имеет один патент на полезную модель.

Рассматриваемая система реализует функции автоматического отслеживания координат с помощью носимых устройств, оснащенных датчиками GPS, ГЛОНАСС, которые с определенной периодичностью передают информацию о местоположении работников на специальный сервер. Установленное на сервере программное обеспечение сопоставляет полученные координаты с рабочими зонами и оповещает исполнителей (дежурных) при возникновении нештатных ситуаций.

Разрабатываемая система предназначена для регистрации состояния стационарных и подвижных объектов и передачи информации к ним. В качестве сети передачи данных предполагается использование технологии с расчетной дальностью уверенной связи до 5 км. Это расстояние определяется максимальным фронтом работ, проводимых одной бригадой.

На рис. 1 представлена схема, поясняющая принцип работы системы. Зеленая зона — это заявленное место проведения работ, огражденное соответствующими знаками и сигналами, т.е. безопасная зона, границы которой определяет руководитель работ. У каждого работника имеется носимый модуль с приемопередатчиком. Система автоматически определяет местоположение работника и, если он находится внутри указанной зоны, то он подсвечен зеленым, если покинул эту зону, то красным.

Требуемая зона охвата разворачиваемой сети должна быть больше, чем зона проведения работ. Одной из первостепенных задач в процессе разработки системы контроля является выбор технологии

передачи данных между объектами. При этом необходимо учитывать следующее:

- отсутствие доступных средств связи на некоторых участках железных дорог;
- обеспечение дальности передачи для покрытия всего участка выполнения работ;
- возможность длительной работы устройств без дополнительной подзарядки в процессе выполнения работ.

Настоящая статья направлена на исследование и выбор технологии беспроводной передачи данных исходя из указанных требований. Рассмотрим существующие технологии передачи данных, возможные для применения в разрабатываемой системе контроля местонахождения работников.

### ZigBee и другие Mesh-протоколы

Стандарт ZigBee (IEEE 802.15.4) используется для подключения устройств умного дома и «интернета вещей» (IoT). Он обеспечивает беспроводную связь между устройствами на расстоянии до 70 метров в помещении и до 400 метров на открытом воздухе. Стандарт ZigBee позволяет устройствам общаться друг с другом и передавать данные на сервер, где они могут быть обработаны и использованы для управления устройствами [3].

Преимуществами технологии ZigBee являются низкое энергопотребление, высокая стабильность и надежность связи, возможность подключения большого количества устройств к одной сети, а также возможность создания многозвенных сетей. Кроме того,

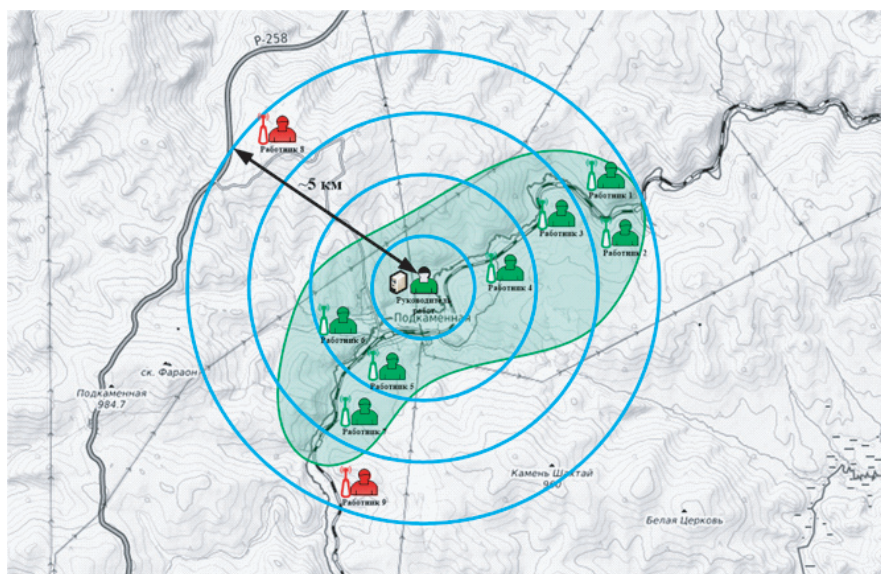


Рис. 1. Принцип работы системы контроля местонахождения работников

стандарт Zigbee имеет высокую защиту от взлома и поддерживает шифрование данных [4].

До появления LPWAN ячеистые сети использовались в основном в системах промышленного «интернета вещей» для организации удаленного мониторинга. При этом решения на базе Zigbee плохо масштабируются из-за сложности настройки и управления сетью, что затрудняет их использование на географически распределенных объектах.

### Технология Wi-Fi

Технология Wi-Fi была разработана в 1997 году и представляет собой семейство цифровых стандартов передачи данных с использованием радиоканала. Наиболее распространенными являются следующие из них: IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ax, IEEE 802.11be.

Рассмотрим работу технологии Wi-Fi на примере протокола IEEE 802.11ax, у которого максимальное количество клиентов составляет 74. IEEE 802.11ax — это стандарт беспроводных локальных сетей (WLAN), также известный как Wi-Fi 6. Он использует технологию множественного ввода и множественного вывода (MIMO), которая позволяет устройствам передавать и принимать данные одновременно на нескольких антеннах. Кроме того, IEEE 802.11ax поддерживает технологию Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA), которая позволяет разбить высокоскоростной поток данных на определенное количество низкоскоростных, каждый из которых передается на своей поднесущей частоте и модулируется [5;6].

В целом, технология Wi-Fi обеспечивает высокую скорость передачи данных, возможность работы без проводов, удобство использования и мобильность. Wi-Fi позволяет подключать к сети множество устройств одновременно и обеспечивает быстрый обмен данными, что делает его идеальным для использования в домашней, офисной и общественной среде.

### Технология WiMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) — это технология широкополосного доступа, которая обеспечивает высокоскоростной доступ в интернет на расстояниях до нескольких километров.

WiMAX-оборудование состоит из базовой станции (BS), которая передает сигналы пользователям, и абонентского оборудования, которое принимает сигналы от BS и передает их на компьютеры или другие устройства. WiMAX может использоваться как самостоятельно, так и в сочетании с другими технологиями, такими как DSL и кабельный модем, для обеспечения более широкого покрытия и лучшего качества связи.

Технология WiMAX работает на основе модуляции с ортогональным разделением частот (OFDM) и в целом схожа с технологией Wi-Fi. WiMAX поддерживает семейство стандартов IEEE 802.16 с различными скоростями передачи, дальностью связи и рабочими частотами. Семейство стандартов IEEE 802.16 описывает протоколы для беспроводных локальных сетей с высокой пропускной способностью, обычно используемых для предоставления услуг беспроводного широкополосного доступа. Эти стандарты определяют физические уровни, MAC-уровни и верхние уровни для беспроводных сетей, обеспечивающих услуги с большой пропускной способностью на больших расстояниях [7;8].

Стандарт IEEE 802.16 определяет два основных типа физического уровня:

1. IEEE 802.16-2004: этот стандарт определяет физический уровень для работы в диапазоне частот от 10 до 66 ГГц. Он включает в себя несколько подтипов, таких как IEEE 802.16a (работает в диапазоне 2–11 ГГц), IEEE 802.16b (работает в диапазоне 10–66 ГГц) и IEEE 802.16e (работает в диапазонах 2,3; 2,5 и 5,7 ГГц).

2. IEEE 802.16d-2010: этот стандарт определяет физический уровень, работающий в диапазоне частот ниже 10 ГГц, включая частоты 2–5 ГГц (например, 3,5 ГГц) и 6–10 ГГц.

Технологии WiMAX и Wi-Fi часто подвергаются сравнению. Это связано с тем, что эти технологии используют беспроводное соединение и предназначены для подключения к каналу обмена данными. Кроме того, обе технологии используют OFDMA для шифрования кодовых посылок.

Wi-Fi — система небольшого радиуса действия (до 300 м), работающая в нелицензированном диапазоне частот 2,4 и 5 ГГц. WiMAX, как и системы сотовой связи, представляет собой сеть с большим радиусом действия (25–80 км) в лицензируемом диапазоне частот 1,5–11 ГГц и 2,33–13,6 ГГц.

В целом технология WiMAX подходит для решения различного рода задач от обеспечения беспроводного широкополосного доступа до организации систем удаленного сбора данных и диспетчерского контроля (SCADA).

### Технология GSM/GPRS (2G)

GSM (Global System for Mobile Communications) — это глобальный стандарт мобильной связи, который был разработан в 1980-х годах. Он стал первым стандартом, который позволил использовать цифровые технологии для передачи голоса в мобильных сетях на частотах от 850 до 1900 МГц. В 1991 году была создана первая сеть GSM в Европе. Она была запущена

в Финляндии и использовалась для передачи данных и голоса. В настоящее время большинство мобильных операторов используют этот стандарт для предоставления услуг мобильной связи своим клиентам.

Основными принципами работы технологии GSM являются использование цифровых сигналов, частотного разделения каналов и временного мультиплексирования. Каждый канал связи GSM может передавать до восьми голосовых каналов одновременно, используя цифровое кодирование. Кроме того, GSM использует SIM-карты, которые хранят информацию о пользователе и его устройстве, позволяя легко переносить номера телефонов между различными устройствами.

Дальнейшее развитие стандарт GSM получил в 2000–2001 годах в виде технологии пакетной передачи данных — GPRS (General Packet Radio Service), с помощью которой удалось существенно увеличить скорость передачи данных до 171,2 Кбит/с. Следует отметить, что GPRS является «надстройкой» над GSM. Это позволяет организовать пакетную передачу данных в существующей сети связи [9].

Технология GPRS использует GMSK (Гауссовская манипуляция с минимальным частотным сдвигом) модуляцию, которая позволяет обеспечить максимальную скорость передачи в заданной полосе частот при постоянном уровне несущей частоты [10].

Применение фильтров низкой частоты с Гауссовской импульсной характеристикой в таком типе модуляции позволяет сузить полосу занимаемых частот, что позволяет выполнять требования, предъявляемые к современным системам мобильной радиосвязи.

### **Технологии UMTS, HSPA, LTE, NR (3G/4G/5G)**

Сотовые сети стандартов 3G/4G/5G обеспечивают надежную, высокоскоростную связь для передачи голоса и потокового видео, но при этом требуют гораздо большего энергопотребления и больших эксплуатационных затрат в сравнении с другими беспроводными технологиями.

Технология 3G (3-Generation) — это технология мобильной связи третьего поколения. Она была разработана в начале 2000-х годов и стала стандартом для мобильных устройств. 3G обеспечивает более высокую скорость передачи данных, чем предыдущие поколения мобильной связи 2G и 2.5G. Сеть 3G была впервые построена в Южной Корее в 2001 году.

Стандарты связи 3G включают в себя различные спецификации, такие как UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), HSPA (High Speed Packet Access) и HSPA+. UMTS является основным стандартом 3G и обеспечивает скорость передачи

данных до 3,6 Мбит/с. HSPA и HSPA+ являются усовершенствованиями UMTS, которые увеличивают скорость передачи данных до 14,4 Мбит/с и 42 Мбит/с соответственно.

Важной особенностью стандарта 3G является «сопровождение» абонентов базовыми станциями. Так, большая часть потока данных абонента проходит через ближайшую базовую станцию, в то время как на более отдаленные станции приходится меньшая его часть, вплоть до тех пор, пока абонент не покинет ее зону действия. Таким образом, за счет передачи потока данных через несколько базовых станций одновременно значительно уменьшается вероятность обрыва связи по сравнению с предыдущими стандартами.

Технология 4G/LTE (4-Generation/Long Term Evolution) начала развиваться в начале 2000-х годов. В 2002 году консорциум 3GPP (организация, занимающаяся разработкой стандартов для мобильной связи) начал работу над новым стандартом, который получил название LTE (Long-Term Evolution). LTE был разработан для предоставления более высокой скорости передачи данных и более эффективного использования спектра частот по сравнению с 3G. В 2009 году первые сети LTE были запущены в Швеции и Южной Корее. В 2010 году организация ITU (International Telecommunication Union) приняла решение переименовать стандарт LTE в 4G.

Дальнейшее развитие стандарт 4G получил в виде VOLTE. VOLTE — это технология передачи голоса через сеть 4G LTE. Она позволяет использовать голосовые вызовы на высоких скоростях, что делает ее более эффективной, чем традиционные голосовые сети [11;12].

Общепринятая частота сигнала стандарта 4G составляет 2600 МГц. Однако, в некоторых регионах используются другие частоты, например, в Москве и Санкт-Петербурге используется частота 1800 МГц, а в Сибири и на Дальнем Востоке — 800 МГц. При этом максимальная скорость 4G может достигать 1 Гбит/с, но реальная скорость зависит от многих факторов, таких как местоположение, нагрузка на сеть, качество сигнала и т.д. В России средняя скорость 4G составляет около 30–40 Мбит/с.

Сети пятого поколения 5G в сравнении с предыдущими стандартами обеспечивают меньшие задержки (15–30 мс) и высокие (до 1–2 Гбит/с) скорости передачи данных и рассматриваются как будущее автономных транспортных средств, робототехнических устройств и комплексов, систем промышленной автоматизации и др.

### **Технологии LPWAN**

Сети LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) представляют собой разновидность беспроводных сетей с большим радиусом действия и низким энерго-



потреблением, которые используются при построении систем на основе «интернета вещей» IoT, комплексов телеметрии различной сложности, межмашинного M2M-взаимодействия и т.д.

Основными преимуществами LPWAN являются: низкое энергопотребление, большой радиус действия, масштабируемость, дешевизна. Современные сети LPWAN используют различные технологии для передачи данных, включая лицензируемые (например, NB-IoT, LTE-M), а также нелицензируемые (например, MIOTY, LoRa, Sigfox). Все эти технологии могут использоваться в сетях LPWAN для различных задач, таких как мониторинг окружающей среды, управление устройствами и сбор данных с датчиков.

Среди различных протоколов нелицензируемого диапазона наибольший интерес представляет технология LoRa.

LoRa (Long Range) — это технология беспроводной связи, разработанная компанией Semtech, которая позволяет передавать данные на большие расстояния с очень низким энергопотреблением. Она использует низкие частоты, что позволяет передавать данные на расстояние до 15 км в открытом пространстве и до 5 км в городской застройке. Кроме того, LoRa имеет открытый исходный код, что позволяет разработчикам создавать свои устройства на ее основе.

Основным преимуществом технологии LoRa является ее высокая энергоэффективность. Также LoRa имеет относительно высокую пропускную способность, что позволяет передавать большие объемы данных. Кроме того, технология LoRa может использоваться для создания сетей IoT и M2M с большим количеством устройств [13;14].

Широкополосный радиосигнал LoRa представляет собой сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Такой сигнал имеет постоянную амплитуду и линейно изменяющуюся частоту, что позволяет увеличить энергию сигнала в заданной полосе частот и тем самым улучшить его способность проникать через помехи.

Одним из недостатков ЛЧМ сигнала является то, что он занимает большую полосу частот, что может создавать проблемы в системах с ограниченным спектром. Кроме того, обработка ЛЧМ сигналов может быть сложной из-за их сложной формы.

Ширина спектра LoRa может варьироваться от 125 до 500 кГц в зависимости от выбранного режима работы и скорости передачи данных (для Российской Федерации используется ширина 125 кГц). При фиксированной ширине спектра радиосигнала изменение его базы осуществляется за счет изменения длительности радиосигнала и скорости изменения частоты.

Физический радиоинтерфейс LoRa основан на использовании широкополосного пропускания сигнала с большой базой (много большей единицы) и низких скоростей передачи данных для достижения больших расстояний связи с низким энергопотреблением. Данный вид радиосигналов имеет две главные особенности:

- ширина спектра радиосигнала значительно больше скорости передачи данных, что обеспечивает передачу большего количества информации за счет использования более широкой полосы частот. Данное свойство может быть полезно для передачи данных на большие расстояния, однако избыточность частоты может привести к увеличению уровня шума и помех, что может ухудшить качество сигнала;

- корреляционная функция существенно уже корреляционной функции узкополосного радиосигнала с базой  $\sim 1$ , что обеспечивает высокую точность и стабильность передачи данных, особенно в системах, где требуется минимальная задержка или высокая пропускная способность.

## Заключение

В результате проведенного анализа были получены основные критерии, по которым осуществлялся выбор беспроводной технологии передачи данных для системы определения местоположения работников, которыми являются: дальность действия (не менее нескольких км), скорость передачи данных (не менее нескольких Kbps) при наименьшей стоимости аппаратуры. На рис. 2 представлены сравнительные характеристики рассмотренных технологий беспроводной передачи данных.

Среди рассматриваемых систем по требуемым критериям наиболее предпочтительными технологиями являются WiMAX, GPRS и LoRa.

Однако, исходя из того, что в настоящий момент на рынке отсутствует современная аппаратура на базе технологии WiMAX, а при использовании технологии GPRS разрабатываемая система будет зависеть от зоны покрытия, то в качестве беспроводной технологии передачи информации была выбрана LoRa, так как она обеспечивает обмен информацией с необходимой скоростью на требуемой дальности при относительно небольшом энергопотреблении. 

*Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» на тему «Разработка требований, стандартной унифицированной методики и нормативно-технической документации для проведения мобильных независимых испытаний аппаратуры спутниковой навигации для железнодорожного транспорта» № 124061000026-8 от 10.06.2024.*

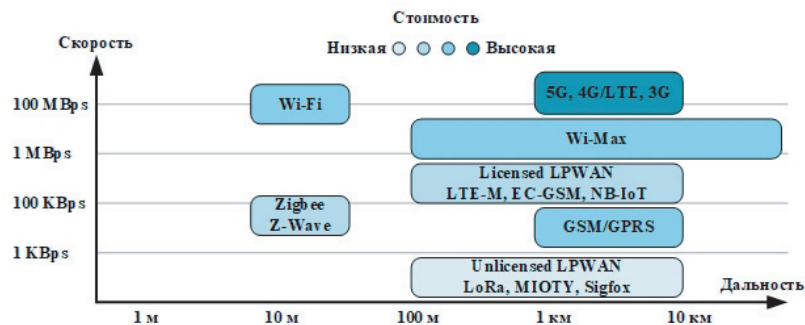


Рис. 2. Сравнительные характеристики различных технологий беспроводной передачи данных

## Литература

1. Базакин, И. А. Использование беспроводных технологий LTE в режиме NB-IoT в системах мониторинга параметров объектов и устройств железнодорожной инфраструктуры / И. А. Базакин, А. И. Годяев, А. В. Меркулов. - Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. - 2019. - № 5 (77). - С. 59-64.
2. Унучков, В. Е. Возможности развития мобильной связи железнодорожного транспорта / В. Е. Унучков, А. В. Яцук. - Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. - 2014. - Т. 1. - С. 349-352.
3. Farah, Y. Study and efficiency analysis of wireless sensor networks based on the IEEE 802.15.4 / Zigbee protocol / Y. Farah, S. E. Sosenushkin // Soft Measurements and Computing. - 2021. - Vol. 43, № 6. - P. 10-16.
4. Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models / M. R. Palattella, T. Engel, L. Ladid [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. - 2016. - Vol. 34, № 3. - P. 510-527.
5. A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs / E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, G. Bianchi // IEEE Communications Surveys and Tutorials. - 2019. - Vol. 21, № 1. - P. 197-216.
6. Kutsenko, S. M. Wi-Max in touch with tomorrow / Problems and prospects of survey, design, construction and exploiting of Northeast Asia transport systems: Students and post-graduate students' works presented at the Second International Scientific-Applied Conference. - Irkutsk: ISTU, 2010. - P. 104-106.
7. Али, А. А. Состояние и перспективы развития беспроводных телекоммуникационных технологий / А. А. Али. - Текст : непосредственный // Вестник Технологического университета. - 2016. - Т. 19, № 1. - С. 108-110.
8. Capacity analysis of reservation-based random access for broadband wireless access networks / A. Vinel, Q. Ni, D. Staehle, A. Turlikov // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. - 2009. - Vol. 27, № 2. - P. 172-181.
9. Quad-band GSM/GPRS/EDGE polar loop transmitter / T. Sowlati, D. Rozenblit, R. Pullela [et al.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. - 2004. - Vol. 39, № 12. - P. 2179-2189.
10. Туляков, Ю. М. Анализ широкополосной передачи данных в современных сотовых системах подвижной наземной радиосвязи / Ю. М. Туляков, Д. Е. Шакаров, А. А. Калашников. - Текст : непосредственный // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. - 2011. - Т. 5, № 1. - С. 29-33.
11. Sivers, M. LTE Positioning Accuracy Performance Evaluation / M. Sivers, G. Fokin // Lecture Notes in Computer Science. - 2015. - Vol. 9247. - P. 393-406. - DOI: 10.1007/978-3-319-23126-6\_35.
12. Цифровая железная дорога и переход от сети GSM-R к LTE-R и 5G R - состоится ли он ? / М. А. Шнепс-Шнеппе, Н. О. Федорова, Г. В. Суконников, В. П. Куприяновский. - Текст : непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. - 2017. - Т. 5, № 1. - С. 71-80.
13. A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things / A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W. M. Townsley // Sensors. - 2016. - Vol. 16, № 9. - P. 1466.
14. Литвинов, С. Н. Особенности применения систем позиционирования на производстве / С. Н. Литвинов, С. А. Ладанов, Е. И. Шеремет. - Текст : непосредственный // Динамика сложных систем — XXI век. - 2023. - Т. 17, № 2. - С. 17-26.