

УДК 621.391

## **Макромодель мультипротокольного взаимодействия сетей LPWAN**

**Талаев А.Д.\*, Бородин В.В.\*\*, Петраков А.М.\*\*\***

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

*\*e-mail: [sa128sha@yandex.ru](mailto:sa128sha@yandex.ru)*

*\*\*e-mail: [doc\\_bor1@mail.ru](mailto:doc_bor1@mail.ru)*

*\*\*\*e-mail: [nio4@mai.ru](mailto:nio4@mai.ru)*

**Статья поступила 01.10.2019**

### **Аннотация**

В настоящее время насчитывается более десятка различных независимых протоколов IoT с кардинально отличающимися характеристиками. Каждый протокол разрабатывается и используется для решения конкретных задач. Датчики таких сетей разворачиваются на местности и не подразумевают использование в сетях других стандартов. Объединение в единую инфраструктуру множества сетей на основе различных стандартов, позволит существенно увеличить универсальность и адаптивность системы в целом. Для развития концепции IoT (интернет вещей) для сетей LPWAN предложена макромодель мультипротокольного взаимодействия сетей. В рамках макромодели определяются возможные способы объединения разноплановых сетей, методы организации управления и классификация основных параметров, необходимых для управления набором сетей.

**Ключевые слова:** интернет вещей, IoT, LPWAN, адаптивные сети, интеграция сетей, топология сети, сенсорные сети

## Введение

Одной из задач развития систем и устройств телекоммуникаций является увеличение эффективности функционирования сетей и обеспечение непрерывного информационного обмена при любых изменениях окружающих условий.

С развитием информационных технологий возникает потребность в беспроводной интеграции большого количества разнообразных датчиков и устройств и обеспечении обмена информационными потоками для межмашинного взаимодействия (M2M – взаимодействие). В основе такого взаимодействия лежат адаптивные, самоорганизующиеся сенсорные сети. Как отмечается в [1, 2, 3, 4] использование сенсорных сетей в промышленности объединено в концепцию индустриального интернета-вещей (IoT) и она выделяется как одно из ключевых направлений развития сетей связи для группового информационного обмена информацией.

Для применения в концепции IoT [5,6], большое распространение получили энергоэффективные сети дальнего радиуса действия, или LPWAN (Low power Wide area Network) для передачи небольших по объёму данных на дальние расстояния.

Уже сейчас насчитывается более десятков различных независимых протоколов IoT с кардинально отличающимися характеристиками [7]. Каждый протокол разрабатывается и используется для решения конкретных задач. Датчики таких сетей разворачиваются на местности и не подразумевают использование в сетях других стандартов. Проблема объединения в единую инфраструктуру

множества сетей на основе различных стандартов, является актуальной задачей для развития беспроводной связи.

Взаимодействие нескольких сетей связи, находят применения как в промышленном, так и в потребительском сегменте. На основе применения набора сетей связи появляется возможность:

- Создания высокоскоростных сетей связи подвижных объектов, для которых обеспечивается энергоэффективное поддержание актуальной транспортной информации дополнительной сетью для обеспечения «горячего старта» системы.
- Перераспределения служебного трафика и телеметрии в межмашинном взаимодействии и повышение общей надежности системы за счет применения разноплановых систем связи с отличающимися характеристиками.
- Объединения в единое информационное пространство систем потребительского и индустриального IoT для сопряжения различных стандартов в областях «умного окружения», и создания единого информационного и сенсорного поля и перераспределение ресурсов для непрерывного выполнения поставленных задач и сохранения качества обслуживания.
- Организации дополнительного канала аутентификации и квитирования для пакетных сетей

Все эти применения предполагают возможность датчиков одной сети подключаться к альтернативным сетям для сохранения своего функционала.

Объединение сетей может производиться на разных уровнях. В настоящее время активно применяются решения для объединения IP сетей на основе концепции ALL-IP [8,9]. Однако, на текущий момент большинство сетей LPWAN [10] и другие сети специального назначения, не реализуют поддержку IP структур и для обеспечения их взаимодействия требуется создание дополнительных управляющих подсистем-решений.

В беспроводных сетях может присутствовать принципиально разный трафик. Реализацию таких требований можно проводить с помощью создания принципиально новых структур, что является не тривиальной задачей, либо, например путем создания мультипротокольных сетей связи.

Использование концепции мультипротокольной сети позволяет объединять разнородные узкоспециализированные стандарты, использовать общие механизмы управления и обеспечивать реконфигурирование используемого набора сетей для оперативного реагирования на изменение окружающих условий, что позволит усиливать сильные стороны и компенсировать их недостатки, повышая адаптивность и связность, существенно расширяя области применения сетей IoT [11].

### **Макромодель мультипротокольного взаимодействия**

Для роста функциональных возможностей сетей IoT, предложена концепция создания мультипротокольной системы связи (МПС), включающая в себя объединение и использование набора узкоспециализированных сетей. МПС предоставляет возможность осуществить выбор оптимальной сети связи и

обеспечить работу в заданных условиях на основе анализа актуальных параметров как сети, так и окружающего пространства, где развернута такая МПС [12].

Выбор оптимальной конфигурации мультипротокольной системы, подразумевает наличие адаптивных механизмов принятия решений. Такие механизмы могут представлять как распределенные решающие узлы, так и отдельное устройство, способное реконфигурировать используемые сети.

В предложенной макромодели мультипротокольного взаимодействия (Рисунок 1), наборы датчиков имеют возможность взаимодействовать с несколькими сетями передачи данных. В составе МПС присутствует модуль, способный управлять сетью и анализировать условия ее работы. Управляющее устройство, по заранее известным критериям на основе получаемой информации о условиях окружающей среды, состоянии датчиков и показателях качества сети, осуществляет выбор на заданном промежутке времени и в определённой зоне оптимальную сеть передачи информации.

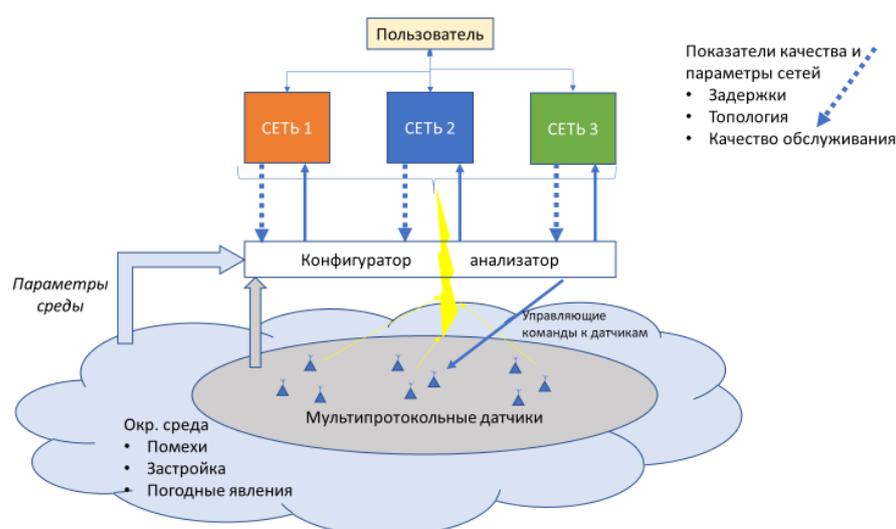


Рисунок 1 - Структура мультипротокольной сети

При взаимодействии сетей в составе МПС модуль анализатора на основе определенного пула параметров по заданному алгоритму выдает команды конфигуратору на изменение структуры сети. Функция в общем виде будем иметь вид:

$$F_i(X_1, X_2, \dots, X_n; Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$$

Где  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – параметры, определяемые средой,  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  – параметры сети.

### Способы управления МПС

Для управления мультипротокольной сетью необходимо определять такой набор характеристик и показателей качества значимых для выбора топологии и применимых для всего набора используемых в МПС сетей связи [13]. Обязательно необходимо учитывать параметры среды, влияющие на систему в зоне ее работы.

Можно выделить следующие группы параметров:

1. Параметры сетей входящих в МПС. Такие параметры, которые определяются характеристиками протокола. Параметры, которые могут быть измерены как локально, так и на основе анализа всей сети в целом.

Например, к ним можно отнести [14, 15]:

- Задержки в передаче информационных пакетов
- Бюджет радиолинии
- Силу сигнала
- Радиус действия

- Скорость передачи данных
- Количество ретрансляций

2. Параметры окружающей среды. Показатели, определяемые условиями функционирования в пространстве, такие как застройка, непреднамеренные помехи, погодные условия и т.д.

- Потери на трассе (застройка, природные явления)
- Помехи (непреднамеренные)
- Местоположение узла (координаты)

В качестве границы определяются минимальные требования к параметрам сети для обеспечения заданного качества обслуживания.

При формировании набора параметров, для управления МПС, необходимо производить нормирование показателей различных сетей для корректной оценки.

### **Варианты объединения сетей IoT**

В рамках модели мультипротокольного взаимодействия можно рассматривать несколько вариантов объединения сетей.

На уровне приложений, взаимодействие осуществляется через соответствующие шлюзы сетей, входящие в МПС, данные от которых, поступают в мультипротокольный сервер приложений, клиентами которого являются конечные пользователи.

В представленной схеме топологии (Рисунок 2) элементом, обеспечивающим взаимодействие сетей, является только мультипротокольный сервер приложений.

Данный подход наиболее оправдан в случае объединения готовых сетевых решений. Возможно применение дополнительных элементов – адаптеров приложений, основной функцией которых является приведение форматов данных от сенсоров к заданному формату, принятому для мультипротокольной сети.

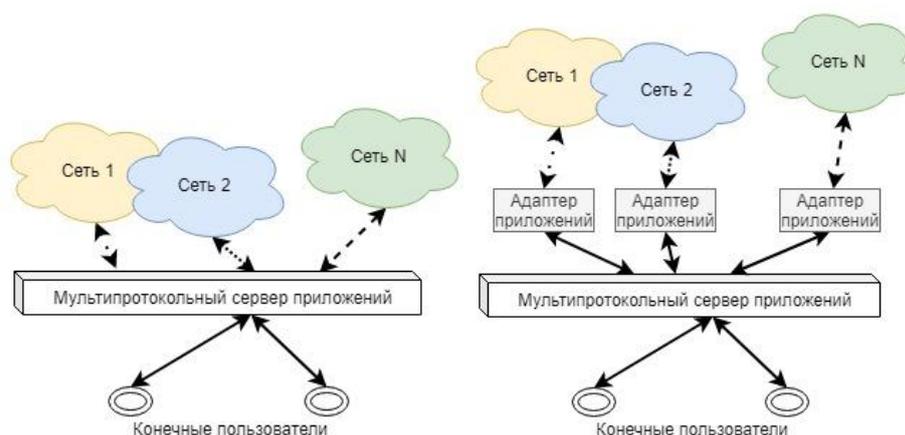


Рисунок 2 - Топология МПС. Объединение с использованием мультипротокольного сервера приложений

Объединение сетей **на уровне шлюзов** содержит наборы монопротокольных сенсоров разного назначения и набор универсальных шлюзов, каждый из которых обеспечивает обмен данными с сенсором любого типа, входящего в состав сети. Шлюз обеспечивает преобразование данных к единому формату, выбранному для МПС, и обеспечивает унифицированный обмен с сервером приложений МПС (Рисунок 3).

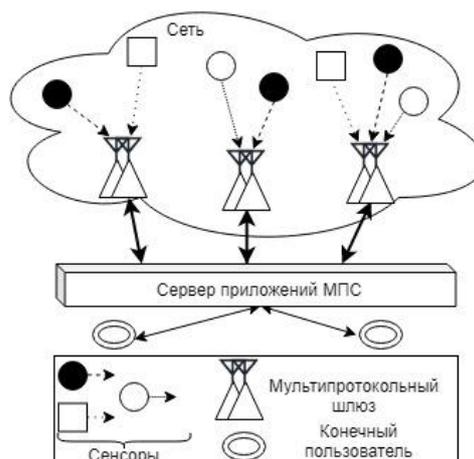


Рисунок 3 - Топология МПС. Объединение с использованием мультипротокольных шлюзов

Такой подход сокращает количество шлюзов, однако при подключении новых сенсоров и сетей к МПС необходимо будет доработать все мультипротокольные шлюзы.

Объединение сетей **на уровне сенсоров**, подразумевает что каждый сенсор содержит программно-аппаратное обеспечение, которое позволяет осуществлять обмены данными в разных сетях с соответствующими монопротокольными шлюзами. Универсальный сенсор может передавать данные, полученные от сенсоров, по одной или нескольким сетям, в зависимости от складывающихся внешних условий или внутреннего состояния сети. Собранные данные поступают в соответствующий сервер приложений, и далее конечным пользователям (Рисунок 4).

Одновременное использование нескольких протоколов одним сенсором может приводить к росту энергоемкости сенсорных элементов и повышать затраты на обеспечение требуемого уровня электропитания.

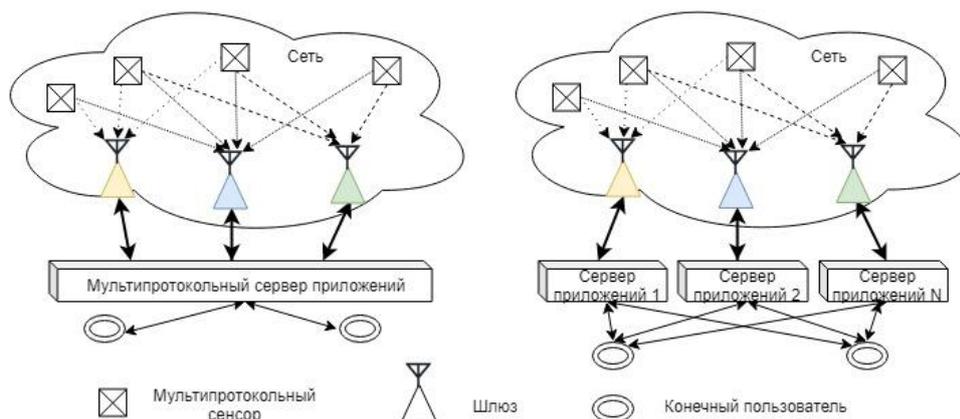


Рисунок 4 - Использование монопротокольного сервера приложений

**Комплексное объединение** сетей позволяет в полной мере реализовать достоинства при совместном использовании различных вариантов объединения при создании сегментов с различными подходами к объединению сетей в зависимости от условий использования.

### Способы управления МПС

На основе возможных вариантов объединения отдельных сетей, производится рассмотрение вариантов построения систем мультипротокольного управления.

Рассматривая возможные методы управления, следует отметить, что управление возможно на основе различных отслеживаемых параметров. Такие параметры могут быть локальными, т.е. определяться непосредственно на узле, так и глобальными – определяемые МПС. Дополнительно необходимо учитывать и принимать для управления параметры, не зависящие от МПС, т.е. условия окружающей среды, помеховая обстановка и загруженность рабочего спектра и т.д.

Для решения задачи управления **на основе локального узла** сети в мультипротокольной системе каждый узел сети оснащен программными и

аппаратными средствами для анализа параметров своей работы, состояния сетей, окружающей обстановки. В этом случае, на основе получаемых параметров, узел способен автономно осуществлять выбор рабочей сети. Мультипротокольная система в таком случае состоит из узлов способных работать в нескольких сетях поочередно (Рисунок 5).

При привязке узлов к местности, узлы, в зависимости от окружающей обстановки и получаемых параметров, будут создавать сегменты сети, работающие на оптимальном в данной области стандарте связи.

При локальном управлении в сетях присутствует большой объем служебного трафика и метод требователен к ресурсу сети, аппаратным возможностям. Остро стоит вопрос о периодичности обновления метрик сети и получения этих данных на каждом из узлов.

В условиях ограниченного ресурса сети и большого количества датчиков и трафика от них, время обновления информации обо всех узлах может стремиться к максимуму, что приводит к переходу сети в нестабильное состояние.

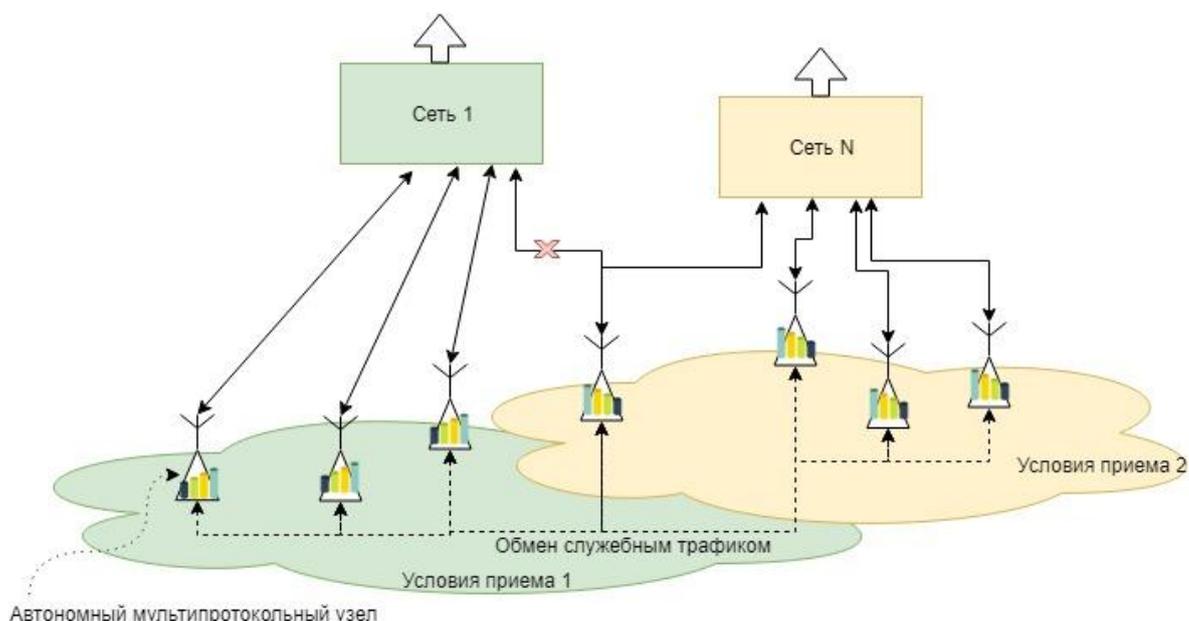


Рисунок 5 - Управление на основе локального узла

Для реализации **централизованной системы управления** в сеть добавляется советующий модуль центра управления (ЦУ), который отвечает за распределение узлов по сетям и реконфигурирование сетью. Решение принимается на основе поступающих от каждого из конечных узлов МПС информации о состоянии самого узла, работающих с ним датчиков и сенсоров и других параметров, которые способен получить узел (помеховая обстановка и др.).

При такой топологии построения МПС, каждый узел с определённой периодичностью отправляет информацию о своем состоянии на ЦУ (Рисунок 6). Возможны варианты реализации, когда информация поступает на ЦУ в несколько этапов.

Первый этап начинается, когда сенсор или конечный узел передает данные на БС сети, в которой он на текущий момент времени работает. В этом случае

доступ к каналу определяется используемой сетью. Для LPWAN сетей характерен случайный доступ с прослушиванием несущей.

Следующий этап — это передача информации о состоянии всех датчиков этой сети от БС (которым может быть один из узлов) до ЦУ. Для оптимизации трафика от разных сетей, и в связи с тем, что сетей на несколько порядков меньше, чем количество датчиков, применяется циклический доступ.

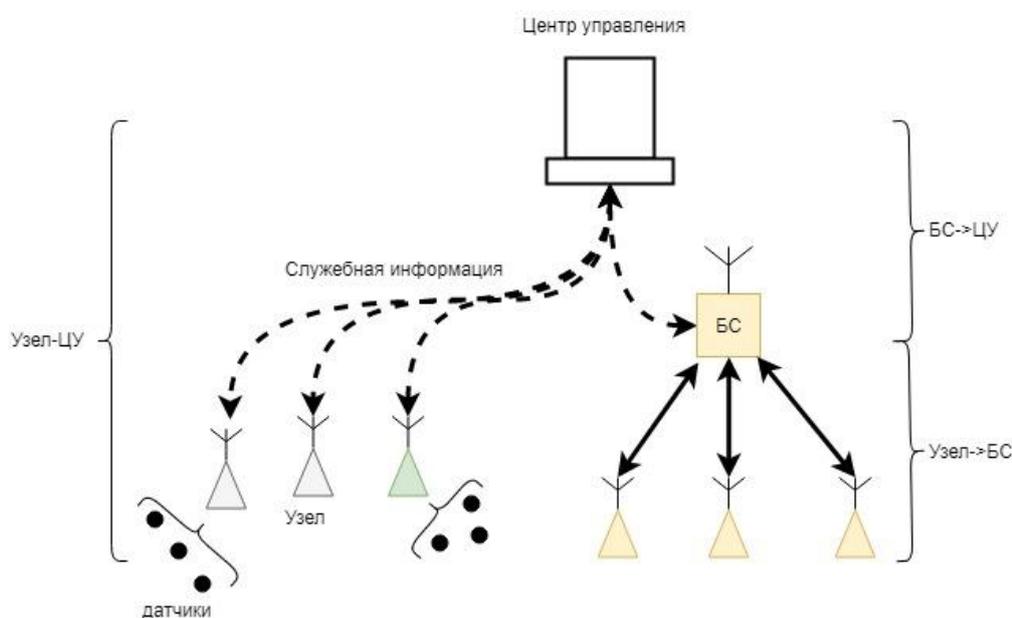


Рисунок 6 - Централизованное управление МПС

При централизованном управлении, необходимо обеспечивать передачу служебного трафика в МПС до ЦУ и обратно. Соответственно, возникает вопрос распределении ресурсов сети для передачи служебной и полезной нагрузки. Для уменьшения служебного трафика узлы могут осуществлять предварительную обработку параметров и информации по смежным сегментам сети.

В связи с тем, что ресурс канала ограничен, передача служебного трафика может происходить по выделенному каналу параллельно с передачей

информационных пакетов, но данный вариант существенно усложняет структуру сети и требования к узлам.

Для реализации в сетях связи на основе готовых решений, в том числе сетей LPWAN, осуществляется разделение канала для служебного и информационного трафика на уровне приложений.

Для оценки поведения МПС при различных способах организации мультипротокольного взаимодействия необходимо применять модернизированные имитационные модели, предназначенные для комплексного моделирования набора сетей связи [16, 17, 18, 19, 20].

### **Заключение**

Предложенная макро модель мультипротокольного взаимодействия сетей LPWAN для реализации концепции IoT, позволяет произвести развертывание универсальной сети связи. Данная сеть связи на основе предложенных способов управления МПС позволит адаптироваться как на изменение окружающей обстановки, так и на изменения вида трафика сети, загрузки и других показателей телекоммуникационной системы.

### **Библиографический список**

1. Кучерявый А.Е. Интернет Вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21 - 24.
2. Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Прокопьев А.В. Самоорганизующиеся сети. - СПб.: Любавич, 2011, - 312 с.

3. Киричек Р.В., Парамонов А.И., Прокопьев А.В., Кучерявый А.Е. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2014. № 4 (8). С. 29 – 41. URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf>
4. Бутенко В. и др. Сети 5G/IMT-2020 & IoT- основа цифровой трансформации // Электросвязь. 2018. № 12. С. 4 - 9.
5. Recommendation Y.2060. Overview of Internet of Things. ITU-T, February 2012, Geneva, available at: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2060-201206-I!!PDF-R&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2060-201206-I!!PDF-R&type=items)
6. Recommendation Y.2069. Framework of the WEB of Things. ITU-T, July 2012, Geneva, available at: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2069-201207-I!!PDF-R&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2069-201207-I!!PDF-R&type=items)
7. Перри Ли. Архитектура интернета вещей. - М.: ДМК Пресс, 2018. - 454 с.
8. Uskela S. All IP architectures for cellular networks // Second International Conference on 3G Mobile Communication Technologies (3G 2001), 2001, doi: [10.1049/cp:20010037](https://doi.org/10.1049/cp:20010037), available at: [https://www.researchgate.net/publication/3897403\\_All\\_IP\\_architectures\\_for\\_cellular\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/3897403_All_IP_architectures_for_cellular_networks)
9. Y. Choi, K.B. Lee and S. Bahk, All-IP 4G Network architecture for efficient mobility and resource management // IEEE Wireless Communications, 2007, vol. 14, no. 2, pp. 42 – 46.

10. Шешалевич В.В. LPWAN - Низкопотребляющие сети большого радиуса действия. Связь для интернета вещей // Безопасность информационных технологий. 2017. Т. 24. № 3. С. 7 - 17.
11. Талаев А.Д., Бородин В.В. Стандарты LPWAN для группового взаимодействия мобильных узлов // Труды МАИ. 2018. № 99. URL:  
<http://trudymai.ru/published.php?ID=91985>
12. De Poorter E. et al. Sub-GHz LPWAN network coexistence, management and virtualization: an overview and open research challenges // Wireless Personal Communications, 2017, vol. 95, no. 1, pp. 187 - 213.
13. Krupka L., Vojtech L., Neruda M. The issue of LPWAN technology coexistence in IoT environment // 17th International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME), IEEE, 2016, Prague, pp. 1 - 8.
14. Design and Test Solutions for the Internet of Things. White papers, Keysight Technologies, 2018, available at: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-2909EN.pdf>
15. IoT — With Great Power Comes Great Challenges. White papers. Keysight Technologies, application note, 2016, available at:  
<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1478EN.pdf>
16. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Имитационная модель для исследования адаптивных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2018. № 100. URL:  
<http://trudymai.ru/published.php?ID=93398>

17. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ эффективности пространственного разделения каналов сенсорных сетей // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 8. С. 3 - 8.
18. Акимов Е.В., Кузнецов М.Н. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей (БСС) // Труды МАИ. 2010. № 40. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=22873>
19. 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>
20. Настасин К.С. Родионов В.В. Особенности маршрутизации в совмещенной сети сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: [http://trudymai.ru/published.php?ID=28108&PAGEN\\_2=2](http://trudymai.ru/published.php?ID=28108&PAGEN_2=2)