

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Назаров А.М., Райимов Ф.Т.

Ташкентский государственный технический университет

г.Ташкент, Узбекистан, ул. университетская 2, nazarov_58@rambler.ru;

farruxrayimov16@gmail.com

Аннотация: *В статье проведен аналитический обзор современных технологий мобильной связи, применяемых для передачи контрольно-измерительных данных в беспроводных сенсорных сетях. Рассмотрены основные стандарты мобильной связи (GSM, GPRS, 3G, 4G LTE, 5G и NB-IoT), их технические характеристики и области применения в системах мониторинга и контроля. Проанализированы преимущества и недостатки различных технологий передачи данных с точки зрения энергоэффективности, пропускной способности, дальности связи и стоимости развертывания. Особое внимание уделено технологиям узкополосного интернета вещей (NB-IoT) и LTE-M, специально разработанным для решения задач передачи малых объемов данных от множества сенсорных устройств. Представлены результаты сравнительного анализа производительности различных технологий мобильной связи в условиях типовых сценариев развертывания сенсорных сетей. Рассмотрены перспективы развития технологий мобильной связи пятого поколения (5G) и их потенциал для создания массовых систем машинного взаимодействия (mMTC). Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и оптимизации беспроводных сенсорных сетей различного назначения.*

Ключевые слова: *беспроводные сенсорные сети, мобильная связь, передача данных, NB-IoT, LTE-M, 5G, интернет вещей, энергоэффективность, мониторинг.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой распределенные системы автономных устройств, оснащенных датчиками, процессорами и

средствами беспроводной связи, предназначенные для мониторинга физических или экологических параметров [1]. В последние годы наблюдается стремительный рост применения БСС в различных областях: от промышленного мониторинга и умных городов до сельского хозяйства и здравоохранения.

Одним из ключевых вопросов при построении эффективных сенсорных сетей является выбор оптимальной технологии передачи данных. Традиционно в БСС использовались технологии ближнего радиуса действия, такие как ZigBee, Bluetooth и Wi-Fi. Однако эти решения имеют существенные ограничения по дальности связи и требуют развертывания собственной инфраструктуры [2].

Технологии мобильной связи предлагают альтернативный подход, позволяющий использовать существующую инфраструктуру операторов сотовой связи для передачи контрольно-измерительных данных от сенсорных узлов. Это особенно актуально для сценариев, требующих широкого географического покрытия, мобильности узлов или удаленного расположения объектов мониторинга.

Целью данной статьи является проведение комплексного анализа современных технологий мобильной связи, применимых для передачи данных в сенсорных сетях, выявление их преимуществ и ограничений, а также определение перспектив дальнейшего развития в контексте интернета вещей (IoT).

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Эволюция технологий мобильной связи для IoT

Развитие технологий мобильной связи прошло несколько этапов, каждый из которых характеризовался увеличением скорости передачи данных и расширением функциональных возможностей. Для применения в сенсорных сетях наибольший интерес представляют следующие технологии:

GSM/GPRS (2G) – первые технологии, обеспечившие возможность передачи данных в сотовых сетях. GPRS (General Packet Radio Service) предоставляет скорость передачи данных до 114 кбит/с, что достаточно для многих приложений мониторинга. Несмотря на устаревание стандарта, многие

операторы продолжают поддерживать 2G сети из-за их надежности и широкого покрытия [3].

3G/UMTS – третье поколение мобильной связи обеспечило значительное увеличение скорости передачи данных (до 42 Мбит/с в HSPA+). Однако высокое энергопотребление делает эти технологии менее привлекательными для автономных сенсорных устройств.

4G LTE – четвертое поколение характеризуется высокой скоростью передачи данных (до 1 Гбит/с) и низкой латентностью. Для нужд IoT были разработаны специализированные варианты: LTE-M (LTE for Machine-Type Communications) и NB-IoT (Narrowband IoT) [4].

5G – пятое поколение мобильной связи предлагает три основных сценария использования: расширенная мобильная широкополосная связь (eMBB), сверхнадежная связь с низкой задержкой (URLLC) и массовая связь типа "машина-машина" (mMTC). Последний сценарий специально ориентирован на поддержку миллионов IoT-устройств на квадратный километр [5].

2. Специализированные технологии для IoT

2.1 NB-IoT (Narrowband IoT)

NB-IoT представляет собой технологию узкополосной связи, разработанную специально для приложений интернета вещей. Основные характеристики NB-IoT:

- Узкая полоса частот (180 кГц)
- Низкое энергопотребление (время автономной работы устройств до 10 лет)
- Глубокое проникновение сигнала (на 20 дБ лучше, чем GSM)
- Высокая плотность подключения (до 50 000 устройств на соту)
- Низкая стоимость модулей связи

NB-IoT идеально подходит для передачи небольших объемов данных от стационарных сенсорных устройств, таких как счетчики коммунальных услуг, датчики парковки, системы мониторинга окружающей среды [3].

2.2 LTE-M (LTE for Machines)

LTE-M является еще одной технологией LPWAN (Low Power Wide Area Network), оптимизированной для IoT-приложений. Преимущества LTE-M:

- Более высокая пропускная способность по сравнению с NB-IoT (до 1 Мбит/с)
- Поддержка голосовой связи (VoLTE)
- Возможность работы в режиме мобильности (хэндовер между сотами)
- Низкая латентность (10-15 мс)
- Умеренное энергопотребление

LTE-M лучше подходит для приложений, требующих передачи средних объемов данных или мобильности устройств, например, носимых медицинских устройств, систем трекинга транспорта, мобильных точек доступа [4].

3. Сравнительный анализ технологий

Таблица 1 представляет сравнительные характеристики основных технологий мобильной связи для сенсорных сетей:

Таблица 1

Параметр	GSM/GPRS	3G	LTE Cat-1	NB-IoT	LTE-M	5G (mMTC)
Скорость передачи (DL)	114 кбит/с	До 42 Мбит/с	10 Мбит/с	~250 кбит/с	1 Мбит/с	>1 Мбит/с
Латентность мс	500-1000	100 мс	50 мс	1.6-10 с	10-15 мс	<10 мс
Время работы от батареи	3-5 лет	<1 года	1-2 года	10+ лет	10+ лет	10+ лет
Плотность устройств (на км ²)	2000	5000	5000	50000	50000	1000000

Покрытие	Отличное	Хороше е	Хороше е	Отличное	Отлично е	Развиваетс я
Мобильност ь	Да	Да	Да	Ограничен а	Да	Да

4. Критерии выбора технологии передачи данных

При выборе технологии мобильной связи для конкретного применения в сенсорных сетях необходимо учитывать следующие факторы:

Энергоэффективность. Для автономных устройств с батарейным питанием критически важно минимизировать энергопотребление. NB-IoT и LTE-M предлагают специальные режимы энергосбережения (PSM – Power Saving Mode и eDRX – extended Discontinuous Reception), позволяющие достичь времени автономной работы до 10 лет [3].

Объем передаваемых данных. Для приложений, передающих малые объемы данных (например, показания датчиков температуры), достаточно возможностей NB-IoT. При необходимости передачи изображений, видео или аудиоданных предпочтительны LTE-M или полноценные LTE/5G технологии.

Латентность. Для систем реального времени, таких как промышленная автоматизация или критические медицинские приложения, требуются технологии с низкой задержкой (LTE-M, 5G URLLC).

Мобильность. Если сенсорные устройства должны работать в движении (носимая электроника, транспортные системы), необходима поддержка хэндовера. В этом случае подходят LTE-M и традиционные сотовые технологии.

Стоимость. Необходимо учитывать как стоимость модулей связи, так и абонентскую плату операторам. NB-IoT и LTE-M модули обычно дешевле, а тарифные планы для IoT предлагают выгодные условия для малых объемов данных [6].

Географическое покрытие. В отдаленных районах доступность различных технологий может существенно отличаться. Сети 2G/3G часто имеют более широкое покрытие, чем новые технологии.

5. Архитектура сенсорной сети на базе мобильной связи

Типовая архитектура сенсорной сети с использованием технологий мобильной связи включает следующие компоненты, как показано на рис. 1.

Схема демонстрирует типовую пятиуровневую архитектуру IoT-системы с использованием технологий мобильной связи. Данные от сенсорных узлов (температура, влажность, качество воздуха, GPS) передаются через базовые станции и сеть оператора на облачную IoT-платформу для дальнейшей обработки, анализа и предоставления конечным пользователям через различные приложения и сервисы. Стрелки показывают направление потока данных от устройств к приложениям.

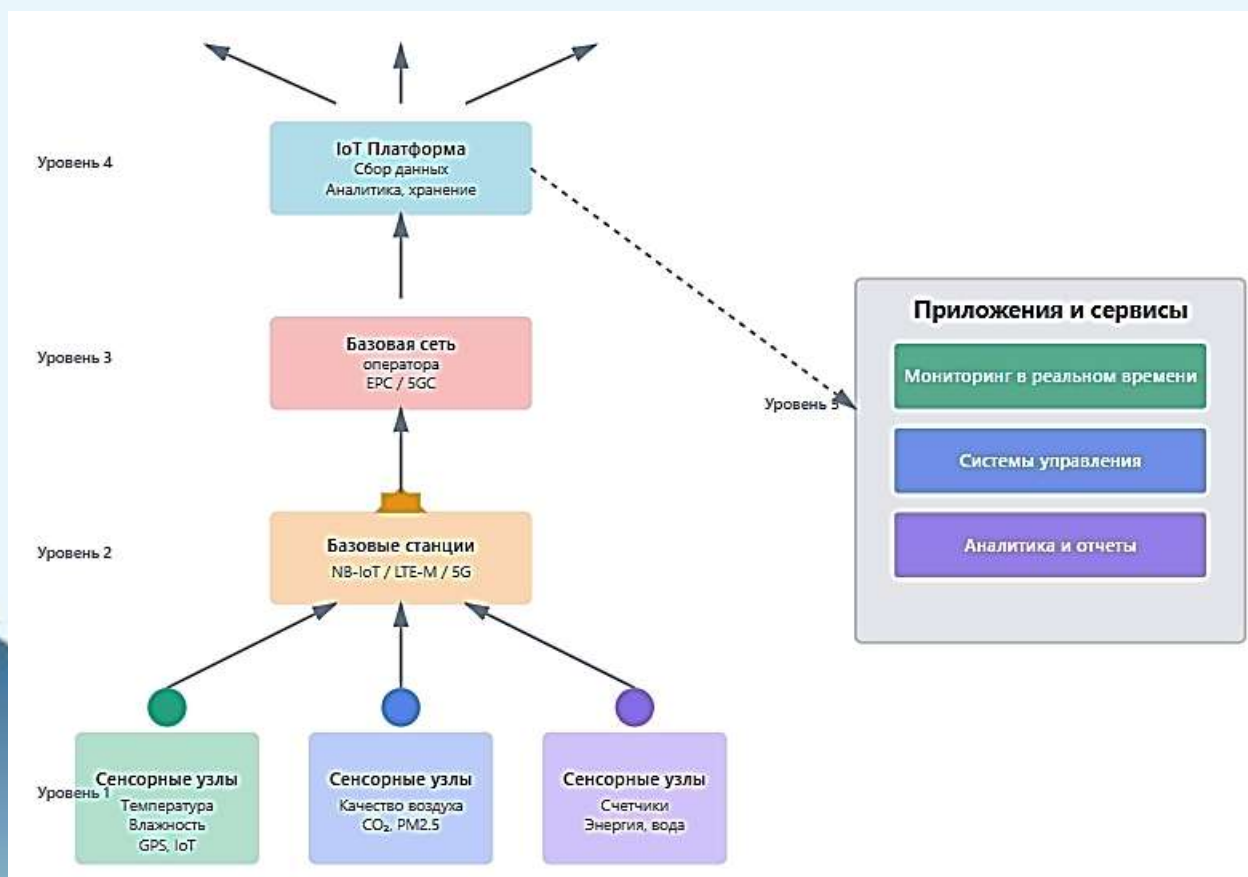


Рис. 1. Архитектура сенсорной сети на базе мобильной связи

1. **Сенсорные узлы** – устройства, оснащенные датчиками и модемами мобильной связи (NB-IoT, LTE-M или другие).

2. **Базовые станции** – инфраструктура оператора связи, обеспечивающая радиопокрытие.
3. **Базовая сеть** – ядро сети оператора (EPC для LTE, 5GC для 5G), выполняющее функции маршрутизации, аутентификации и управления.
4. **IoT платформа** – облачный сервис для сбора, хранения и обработки данных от сенсорных устройств.
5. **Приложения** – конечные пользовательские сервисы (системы мониторинга, аналитики, управления).

6. Применение в различных отраслях

Умные города. Мониторинг качества воздуха, управление освещением, интеллектуальные парковки, контроль отходов – все эти приложения используют сенсорные сети на базе NB-IoT и LTE-M.

Промышленность. Предиктивное обслуживание оборудования, мониторинг производственных процессов, логистика – требуют надежной передачи данных в реальном времени.

Сельское хозяйство. Мониторинг почвы, погодных условий, автоматизация орошения — часто реализуются в удаленных районах, где мобильная связь является единственным доступным решением.

Здравоохранение. Носимые медицинские устройства, системы удаленного мониторинга пациентов используют LTE-M для передачи данных о состоянии здоровья.

Энергетика. Умные счетчики электроэнергии, газа и воды массово разворачиваются на базе NB-IoT из-за низкого энергопотребления и широкого покрытия.

7. Перспективы развития

Технологии 5G открывают новые возможности для сенсорных сетей (рис. 2):

- **Массовая связь mMTC** – поддержка до 1 миллиона устройств на квадратный километр
- **Сетевые срезы (Network Slicing)** – выделение виртуальных сетей с гарантированными параметрами для различных типов IoT-приложений

- **Граничные вычисления (Edge Computing)** – обработка данных непосредственно на границе сети, снижение латентности
- **Интеграция с AI/ML** – интеллектуальное управление сетевыми ресурсами и оптимизация энергопотребления [5].

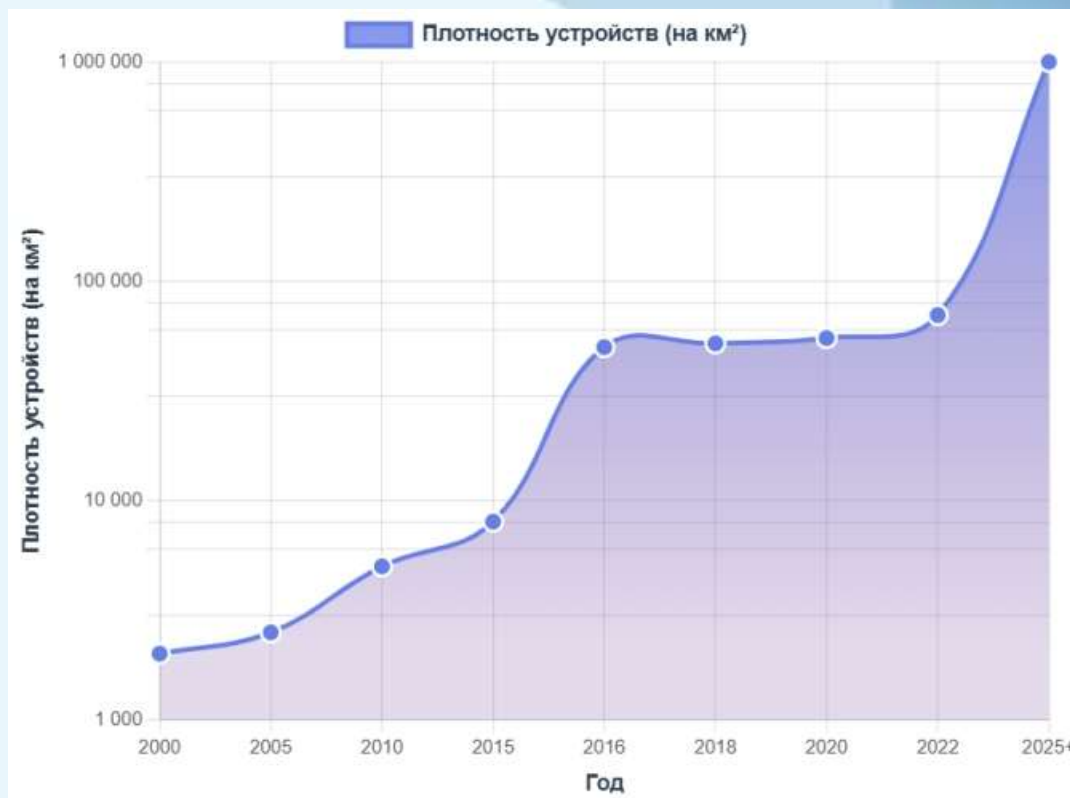


Рис. 2. Эволюция IoT-технологий мобильной связи

График иллюстрирует экспоненциальный рост плотности подключаемых устройств на квадратный километр от поколения к поколению мобильной связи. Технологии 5G (mMTC) обеспечивают поддержку до 1 миллиона устройств на км², что на порядки превышает возможности предыдущих поколений и открывает новые перспективы для массового развертывания сенсорных сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что технологии мобильной связи предоставляют эффективное решение для передачи контрольно-измерительных данных в беспроводных сенсорных сетях. Специализированные технологии NB-IoT и LTE-M, разработанные специально для интернета вещей,

обеспечивают оптимальное сочетание энергоэффективности, покрытия и стоимости для большинства IoT-приложений.

Выбор конкретной технологии должен основываться на требованиях конкретного приложения с учетом таких факторов, как объем передаваемых данных, латентность, мобильность устройств, энергопотребление и географическое покрытие. Для приложений с малыми объемами данных и стационарными устройствами оптимальным выбором является NB-IoT, в то время как LTE-M лучше подходит для сценариев с мобильными устройствами и средними объемами данных.

Развитие технологий 5G, особенно сценария mMTC, открывает новые перспективы для создания массовых сенсорных сетей с беспрецедентной плотностью подключений и интеллектуальным управлением ресурсами. Интеграция сетевых срезов, граничных вычислений и технологий искусственного интеллекта позволит создавать более эффективные и адаптивные системы мониторинга и управления.

Результаты исследования могут быть использованы разработчиками и проектировщиками беспроводных сенсорных сетей для обоснованного выбора технологий передачи данных в зависимости от специфики конкретных применений и требований системы.

Список литературы

1. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey // Computer Networks. – 2002. – Vol. 38, No. 4. – P. 393-422. DOI: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4
2. Miorandi D., Sicari S., De Pellegrini F., Chlamtac I. Internet of things: Vision, applications and research challenges // Ad Hoc Networks. –2012. –Vol. 10, No. 7. –P. 1497-1516. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.02.016
3. Ratasuk R., Vejlgaard B., Mangalvedhe N., Ghosh A. NB-IoT system for M2M communication // 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. –IEEE, 2016. –P. 1-5. DOI: 10.1109/WCNC.2016.7564708

4. Adhikary A., Lin X., Wang Y.-P.E. Performance evaluation of NB-IoT coverage // 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). – IEEE, 2016. – P. 1-5. DOI: 10.1109/VTCFall.2016.7881160
5. Palattella M.R., Dohler M., Grieco A., et al. Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2016. – Vol. 34, No. 3. – P. 510-527. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2525418
6. Сухов А.М. Сравнительный анализ технологий беспроводной связи для интернета вещей // Вестник связи. – 2018. – № 3. – С. 12-18.