

Научная статья

УДК 004

DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-1-49-61

Применение системы массового обслуживания для исследования характеристик канала связи в IoT-сетях

Сергей Валерьевич Малахов¹, Денис Олегович Якупов²
Ангелина Алексеевна Осипова³, Дарья Александровна Копылова⁴
Екатерина Александровна Зеленина⁵

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, Россия

¹s.malakhov@psuti.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8666-6713>

²d.yakupov@psuti.ru, <https://orcid.org/00090009-0003-2371-0822>

³ange.osipowa2004@yandex.ru

⁴koroll.aleks@mail.ru

⁵0kate.zc0@gmail.com

Аннотация

Статья содержит подробную информацию о применении теории систем массового обслуживания (СМО) в сетях интернета вещей (IoT). Подробно рассматриваются математические модели, применяемые для анализа и оптимизации предоставления услуг в различных системах, включая IoT. Освещаются различные аспекты использования теории очередей в сетях IoT, такие как моделирование трафика, оптимизация передачи данных и использование стохастических моделей для более точного анализа. Исследование характеристик канала связи в сетях IoT представляет ключевую и актуальную проблему в условиях стремительного развития IoT-технологий. С ростом количества подключенных устройств становится критически важным обеспечить эффективность и надежность канала связи, а также оптимизировать использование ресурсов IoT-устройств. Данное исследование направлено на изучение и теоретический анализ характеристик канала связи в IoT с использованием систем массового обслуживания. В работе проводится анализ особенностей канала связи в IoT, изучаются методы моделирования канала, анализируются задержки передачи данных, оценивается и увеличивается пропускная способность, применяются методы систем массового обслуживания и исследуются области применения полученных результатов, прогнозируется развитие IoT, делается итоговый обзор научной работы. Интернет вещей (IoT) является сетью взаимодействующих устройств, использующих датчики и уникальные идентификаторы для обмена информацией. Широкое применение IoT в умных домах, энергетике, медицине, логистике и других секторах ускоряется благодаря современным технологиям искусственного интеллекта и машинного обучения.

Ключевые слова

сети IoT, теория очередей, системы массового обслуживания (СМО), моделирование трафика, оптимизация передачи данных, стохастические модели, высокая пропускная способность, низкая задержка, надежность

Для цитирования

Малахов С. В., Якупов Д. О., Осипова А. А., Копылова Д. А., Зеленина Е. А. Применение системы массового обслуживания для исследования характеристик канала связи в IoT-сетях // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2024. Т. 22, № 1. С. 49–61. DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-1-49-61

© Малахов С. В., Якупов Д. О., Осипова А. А., Копылова Д. А., Зеленина Е. А., 2024

The Use of a Queuing System to Study the Characteristics of the Communication Channel in IoT Networks

Sergey V. Malakhov¹, Denis O. Yakupov², Angelina A. Osipova³,
Daria A. Kopylova⁴, Ekaterina A. Zelenina⁵

Povolzhskiy State University of Telecommunications & Informatics,
Samara, Russian Federation

¹s.malakhov@psuti.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8666-6713>

²d.yakupov@psuti.ru, <https://orcid.org/00090009-0003-2371-0822>

³ange.osipowa2004@yandex.ru

⁴koroll.aleks@mail.ru

⁵okate.ze0@gmail.com

Abstract

The article contains detailed information on the application of the theory of queuing systems (QMS) in the Internet of Things (IoT) networks. The article discusses in detail the mathematical models used to analyze and optimize the provision of services in various systems, including IoT. Various aspects of the use of queue theory in IoT networks are highlighted, such as traffic modeling, data transfer optimization, and the use of stochastic models for more accurate analysis. The study of the characteristics of the communication channel in IoT networks is a key and urgent problem in the context of the rapid development of IoT technologies. With the growing number of connected devices, it becomes critically important to ensure the efficiency and reliability of the communication channel, as well as optimize the use of IoT device resources. This study is aimed at studying and theoretical analysis of the characteristics of the communication channel in IoT using queuing systems. The paper analyzes the features of the communication channel in IoT, examines channel modeling methods, analyzes data transmission delays, evaluates and increases throughput, applies queuing system methods and explores the applications of the results obtained, predicts the development of IoT and makes a final review of scientific work. The Internet of Things (IoT) is a network of interacting devices that use sensors and unique identifiers to exchange information. The widespread use of IoT in smart homes, energy, medicine, logistics and other sectors is accelerating thanks to modern artificial intelligence and machine learning technologies.

Keywords

IoT networks, queueing theory, mass service systems (MSS), traffic modeling, data transfer optimization, stochastic models, high throughput, low latency, reliability

For citation

Malakhov S. V., Yakupov D. O., Osipova A. A., Kopylova D. A., Zelenina E. A. The use of a queuing system to study the characteristics of the communication channel in IoT networks. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2024, vol. 22, no. 1, pp. 49–61 (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-1-49-61

Введение

Исследование характеристик канала связи в IoT-сетях является важной и актуальной проблемой в контексте быстрого развития IoT-технологий. С увеличением числа подключенных устройств становится критично не только обеспечение эффективности и надежности канала связи, но и оптимизация использования ресурсов IoT-устройств¹.

Устройства IoT полагаются на коммуникацию для взаимодействия друг с другом и внешними системами, такими как облачные платформы и мобильные приложения [1].

Цель данного исследования заключается в изучении и теоретическом анализе характеристик канала связи с использованием систем массового обслуживания в IoT.

Исследование включает анализ характеристик канала связи в IoT, определение основных концепций и технологий, изучение методов моделирования канала, анализ задержек передачи данных, оценку и увеличение пропускной способности, применение систем массового об-

¹ Characteristics of IoT. URL: <https://unstop.com/blog/characteristics-of-iot> (дата обращения: 19.02.2024).

служивания, исследование областей применения результатов, прогнозирование развития IoT и подведение итогов научной работы.

Основные понятия и технологии

Интернет вещей (IoT) представляет собой сеть устройств, которая взаимодействует друг с другом, используя датчики, аппаратное обеспечение и уникальные идентификаторы. Они позволяют устройствам обмениваться информацией между собой и передавать ее в центральную сеть, не требуя постоянного контроля со стороны человека².

Эта концепция применяется в разнообразных отраслях, начиная от мониторинга потребительского поведения в реальном времени и заканчивая оптимизацией рабочих процессов в различных секторах. IoT широко используется в умных домах, энергетике, медицине, логистике и многих других областях³.

Проникновение IoT в нашу повседневную жизнь ускорилося благодаря быстрому технологическому прогрессу. Современные разработки в области искусственного интеллекта, машинного обучения и передовых вычислений значительно повысили возможности IoT. Эти технологии помогают устройствам IoT извлекать ценные уроки из данных, предсказывать события и действовать автономно на основе накопленной информации. Например, с помощью искусственного интеллекта устройства IoT могут осуществлять анализ данных с датчиков для оптимизации энергопотребления в зданиях, снижения затрат и улучшения экологической эффективности.

Следует также отметить значительный вклад передовых вычислений, включая облачные и периферийные вычисления, в расширение возможностей IoT. Облачные вычисления предоставляют мощные ресурсы для хранения и обработки огромного объема данных, сгенерированных устройствами IoT, в то время как периферийные вычисления приближают вычислительные мощности к самим устройствам, обеспечивая оперативное принятие решений в реальном времени. Сила сочетания IoT, искусственного интеллекта и передовых вычислений привела к появлению «умных домов», «умных городов» и «умных производств», которые делают нашу жизнь удобнее и более экологически устойчивой⁴.

Системы массового обслуживания (СМО) – математические модели для анализа и оптимизации обслуживания в различных системах, включая IoT. СМО в IoT-сетях помогают аналитически моделировать передачу данных, повышая эффективность и качество обслуживания. Этот подход помогает оптимизировать трафик, улучшать процессы передачи данных и снижать нагрузку на сеть.

Основные понятия в теории СМО включают интенсивность входного потока, интенсивность обслуживания, размер очереди, время ожидания и время обслуживания. Эти концепции – основополагающие для анализа и оптимизации обслуживания в различных системах, включая IoT-сети.

Использование систем массового обслуживания в контексте интернета вещей представляет собой область исследования, требующую внимательного рассмотрения ряда дополнительных аспектов, влияющих на эффективность функционирования сети.

Первым из таких аспектов является моделирование трафика, что имеет важное значение в создании математических моделей, отражающих потоки данных в сети IoT. Этот процесс

² Why IoT Matters in Today's Modern World | Techreviewer. URL: <https://techreviewer.co/blog/why-iot-matters-in-todays-modern-world> (дата обращения: 19.02.24).

³ Что такое IoT и что о нем следует знать / Хабр. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/549550/> (дата обращения: 19.02.24).

⁴ Интернет вещей (IoT): что это такое и в чем разница между обычным IoT и IIoT. URL: <https://cloud.vk.com/blog/iot-dlya-umnyh-chasov-iiot-umnyh-stankov-internet-veshchej> (дата обращения: 19.02.24).

обеспечивает возможность анализа и прогнозирования нагрузки на сеть, что является ключевым фактором для оптимизации ее работы.

Второй аспект эффективного управления передачей данных – это определение пропускной способности и задержек. Пропускная способность определяет максимальный объем данных, который может быть передан через сеть в единицу времени, тогда как задержка отражает время, необходимое для передачи данных от отправителя к получателю.

Третий аспект касается оптимизации передачи данных, что включает в себя настройку параметров сети для достижения максимальной эффективности и скорости передачи данных. Кроме того, улучшение обслуживания и снижение нагрузки направлены на повышение качества обслуживания конечных пользователей и обеспечение стабильной работы устройств IoT. Использование различных стратегий управления потоком данных, например, таких как FIFO или LIFO, где FIFO означает, что данные обрабатываются в порядке их поступления, а LIFO – что последние данные обрабатываются в первую очередь, представляет собой существенный аспект в обеспечении эффективной обработки данных в сети.

Немаловажным аспектом можно выделить анализ задержек передачи данных, а также аппроксимацию дисперсии задержек. Эти элементы являются важными для понимания изменчивости времени передачи данных в сети и принятия соответствующих мер по оптимизации работы системы⁵.

Применение СМО в сетях передачи данных может быть представлено следующими примерами.

1. Гибкий коммутатор (Softswitch): использование СМО для обработки обычных телефонных звонков и звонков на бесплатные номера «800». В таких случаях возможно возвращение части заявок на обслуживание на вход коммутатора, что создает дополнительный поток входящих заявок (поток обратной связи).

2. Моделирование работы центра коммутации мобильной связи (MSC): исследование взаимодействия MSC с базами данных регистра местоположения (HLR), регистра перемещений (VLR), центра аутентификации (AUC) и другими компонентами сети для оптимизации процессов передачи данных.

3. Двухфазная бесконечно линейная система: использование математической модели системы массового обслуживания требований случайного объема для исследования двухфазной бесконечно линейной системы в сети.

4. Расчет параметров линий связи информационно-управляющих систем: применение моделей СМО для решения задач, связанных с оптимизацией параметров линий связи в информационно-управляющих системах.

5. Исследование процессов передачи видеопотоков в пакетных сетях: применение СМО для анализа и оптимизации процессов передачи видеопотоков в сетях передачи данных, что позволяет улучшить качество и эффективность передачи мультимедийного контента.

6. Управление качеством обслуживания (QoS): использование СМО для управления качеством обслуживания в сетях с высокой пропускной способностью, таких как сети 5G и выше. Это позволяет оптимизировать передачу данных, учитывая требования пользователей и ограничения сети.

7. Распределение ресурсов в сетях с облачным хостингом: использование СМО для распределения ресурсов в сетях с облачным хостингом, включая выделение виртуальных машин и ресурсов хранения. Это позволяет оптимизировать использование ресурсов и уменьшить задержки в передаче данных.

8. Моделирование работы сети IoT: использование СМО для моделирования работы сети IoT, включая анализ трафика, задержек и потерь пакетов. Это позволяет оптимизировать работу сети и улучшить качество обслуживания пользователей.

⁵ Основы систем массового обслуживания: определение, компоненты и методы анализа. URL: <https://nauchniestati.ru/spravka/sistemy-massovogo-obsluzhivaniya/> (дата обращения: 19.02.24).

Моделирование канала связи в IoT

СМО позволяют аналитически моделировать и оптимизировать процессы передачи данных, улучшая их эффективность и качество обслуживания. Это важно для обеспечения работы IoT-сетей, которые требуют высокой пропускной способности, низких задержек и надежности [2; 3].

Метод моделирования канала связи в IoT-сетях включает следующие этапы.

1. Определение характеристик канала связи – пропускная способность, задержки, потери данных.
2. Выбор модели СМО, в зависимости от требований.
3. Анализ трафика – интенсивность входного потока и обслуживания.
4. Очередь и время ожидания – размер и время ожидания заявок в системе.
5. Анализ времени обслуживания и оптимизация – время обслуживания и улучшение процессов передачи данных [4].
6. Оптимизация качества обслуживания и нагрузки на сеть – улучшение времени ожидания, времени обслуживания и пропускной способности, а также снижение нагрузки на сеть.

Использование стохастических моделей для моделирования канала связи в IoT позволяет учесть случайные переменные и вероятностные законы. Стохастические модели широко применяются в различных областях, включая информатику, физику, экономику и другие, и позволяют более точно учитывать случайные факторы в моделировании процессов обслуживания⁶.

Моделирование каналов передачи данных в IoT является важным аспектом исследования IoT-сетей. Оно позволяет анализировать и оптимизировать процессы передачи данных, улучшая качество обслуживания и эффективность сети. Существует множество протоколов беспроводной сети IoT, каждый с особенностями и недостатками, выбор зависит от требований. Для моделирования используются различные методы, включая стохастические модели и моделирование систем NB-IoT. Стохастические модели учитывают случайные факторы, обеспечивая точное моделирование процессов передачи данных и обслуживания. Одним из ключевых аспектов является выбор подходящего протокола и оптимизация процессов передачи данных, что существенно влияет на работоспособность IoT-сетей⁷.

Системы массового обслуживания являются эффективным инструментом для моделирования канала связи в IoT-сетях. Они позволяют аналитически моделировать и оптимизировать процессы передачи данных, улучшая их качество обслуживания и используя для моделирования различных аспектов, а также для оценки характеристик канала связи в IoT-сетях.

Одним из примеров применения СМО для оценки характеристик канала связи является моделирование мультиплексирования разноприоритетных сообщений. Системы массового обслуживания позволяют распределять каналы передачи за потоками данных с разными приоритетами, что важно для обеспечения успешной работы IoT-сетей. Кроме того, СМО могут использоваться для расчета характеристик линий связи информационно-управляющих систем.

Выбор варианта организации системы массового обслуживания, обслуживающей неоднородные заявки в зависимости от стоимости содержания каналов также является важным аспектом использования СМО для оценки характеристик канала связи в IoT-сетях. Они позволяют выбирать оптимальную организацию обслуживания в зависимости от стоимости содержания каналов и также могут использоваться для моделирования различных типов каналов

⁶ Ограничение пропускной способности: что это такое и как оно влияет на работу сетей. URL: <https://obzorposudy.ru/polezno/ogranichenie-propusknoi-sposobnosti-ponyatie-i-primery> (дата обращения: 19.02.24).

⁷ Сравнительный анализ стандартов связи для сетей IoT / Хабр. URL: <https://habr.com/ru/companies/msw/articles/720518/> (дата обращения: 19.02.24).

передачи данных в IoT-сетях, таких как беспроводные каналы связи, кабельные каналы связи и другие^{8,9}.

Характеристики канала связи в IoT

Задержки в передаче данных влияют на производительность IoT. Они могут привести к сбоям в критически важных функциях, требующих реального времени. Перегрузка сети, расстояние и обработка данных влияют на задержки [5]. Важно поддерживать задержки для обеспечения качества обслуживания.

Технические задержки связаны с ограничениями инфраструктуры, пропускной способностью и временем передачи данных. Временные задержки происходят из обработки данных на устройствах, включая сервера и конечные устройства¹⁰. Оптимизация обработки данных и производительности сетей сокращает временные задержки.

Расстояние между устройствами, скорость передачи данных, количество устройств в сети и технические характеристики сети – ключевые факторы, влияющие на задержку передачи данных. Большие расстояния и низкая скорость увеличивают временные задержки. Увеличение числа устройств может вызвать узкие места и конфликты, приводя к задержкам. Технические параметры сети, такие как пропускная способность и качество соединения, также влияют на скорость и надежность передачи данных.

Оценка и оптимизация пропускной способности в IoT критичны для эффективной передачи данных. NB-IoT, обладающий низкой скоростью передачи, подходит для устройств с ограниченной мощностью и долгим сроком службы батареи, характерен для стационарных устройств с небольшим объемом данных.

Для улучшения оценки канала в NB-IoT исследователи предложили методы, включая перекрывающийся полосами SVD LMMSE, чтобы повысить точность и уменьшить сложность оценки канала.

Для повышения пропускной способности в сетях IoT применяют различные методы. Например, расширение пропускной способности NB-IoT позволяет использовать внутрдиапазонное соединение, даже если ширина канала составляет всего 200 кГц [6].

Также важно использовать многопередатчиковые системы, которые увеличивают доступную пропускную способность. Для балансировки нагрузки и увеличения пропускной способности подключенных устройств целесообразно использовать сети IoT без ячеек [7].

Потеря пакетов – это ситуация, когда данные не достигают получателя из-за различных причин. В IoT-сетях проблемы с потерей пакетов возникают из-за перегрузки сети, слабого сигнала, помех, системного шума, несовершенных настроек и старого оборудования [8].

Беспроводные сети, особенно Wi-Fi, более подвержены потере пакетов, чем проводные соединения. Для улучшения производительности и надежности сети IoT важно анализировать и исправлять эти причины [9].

Увеличение пропускной способности, глубокая инспекция пакетов и обновление ПО и оборудования помогают предотвратить потерю пакетов. Использование проводных соединений, мониторинг производительности и оптимизация MTU и буфера на маршрутизаторе снижают вероятность потерь. VPN и замена неисправного оборудования также важны для надежности сети.

⁸ Системы тестирования сетей 5G. URL: <https://2test.ru/news/publikatsii/sistemy-testirovaniya-setey-5g/> (дата обращения: 19.02.24).

⁹ Погружение в мир AI: курсы, проекты, советы. URL: https://aicomb.ru/primenenie-ii-v-povsednevnoj-zhizni/intellektualnye_sistemy_v_telekommunikatsijah_uluchshenie_kachestva_svjazi_i_optimizatsija_setej/ (дата обращения: 19.02.24).

¹⁰ What is Packet Loss. URL: <https://www.fortinet.com/it/resources/cyberglossary/what-is-packet-loss> (дата обращения: 19.02.2024).

Теоретические модели и анализ

Существует разнообразие моделей систем массового обслуживания, применяемых для изучения и улучшения работы систем.

1. Модель М/М/1:

- М означает экспоненциальный (пуассоновский) поток клиентов;
- М означает экспоненциальное время обслуживания;
- 1 означает одно обслуживающее устройство.

Эта модель описывает систему, где поступают клиенты в соответствии с экспоненциальным распределением (М), время обслуживания также подчиняется экспоненциальному распределению (М), и имеется только один сервер. Она широко применяется для анализа производительности систем, где не существует ограничений на длину очереди и заявки поступают в соответствии с процессом Пуассона.

2. Модель М/М/с:

- М означает экспоненциальный поток клиентов;
- М означает экспоненциальное время обслуживания;
- с означает число параллельных обслуживающих устройств.

Эта модель является расширением предыдущей модели и включает несколько параллельных серверов. Применяется в случаях, когда есть несколько серверов, которые могут одновременно обслуживать клиентов. Оптимизация производительности системы в этой модели происходит путем выбора оптимального количества обслуживающих устройств.

3. Модель М/Г/1:

- М означает экспоненциальный поток клиентов;
- Г означает произвольное (общее) время обслуживания;
- 1 означает одно обслуживающее устройство.

Эта модель представляет собой расширение модели М/М/1, где время обработки заявок уже необязательно подчиняется экспоненциальному распределению, а может быть произвольным (обозначается как Г). Это делает модель более гибкой при анализе реальных сценариев, где время обработки может варьироваться в зависимости от различных факторов.

4. Модель М/Г/с:

- М означает экспоненциальный поток клиентов;
- Г означает произвольное время обслуживания;
- с означает число параллельных обслуживающих устройств.

Аналогично модели М/Г/1, здесь учитывается возможность произвольного времени обработки заявок, а также присутствует несколько параллельно работающих обслуживающих устройств. Оптимальное количество устройств подбирается для максимизации производительности системы, учитывая различные характеристики времени обработки и потребности в обслуживании.

Каждая из этих моделей систем массового обслуживания предоставляет математический инструментарий для анализа и оптимизации систем массового обслуживания с различными характеристиками поступления и обработки заявок¹¹.

При оценке эффективности систем массового обслуживания (СМО) важно учитывать несколько ключевых показателей.

1. Среднее время пребывания заявки в СМО: показывает время, проведенное заявкой в системе до обслуживания.

2. Вероятность обслуживания заявки: определяет вероятность успешного обслуживания заявки.

¹¹ Модель системы массового обслуживания: основные принципы и применение в реальной жизни. URL: <https://nauchniestati.ru/spravka/model-sistemy-massovogo-obsluzhivaniya/> (дата обращения: 19.02.24).

3. Среднее занятое количество каналов: низкое значение может указывать на неэффективное использование ресурсов.

4. Среднее количество занятых мест в очереди: высокое число может привести к отказам.

Анализируя ключевые параметры работы систем массового обслуживания в моделях М/М/1, М/М/с, М/Г/1 и М/Г/с, можно выделить следующие характеристики (табл. 1).

Таблица 1

Анализ работы систем массового обслуживания
в моделях М/М/1, М/М/с, М/Г/1 и М/Г/с

Table 1

Analysis of the operation of queuing systems
in the models М/М/1, М/М/с, М/Г/1 and М/Г/с

Параметр	М/М/1	М/М/с	М/Г/1	М/Г/с
Среднее время пребывания заявки в СМО	Низкое	Зависит от (с)	Разнообразие во времени обслуживания может привести к изменчивости времени пребывания заявки в системе	Зависит от (с)
Вероятность обслуживания заявки	Постоянная, не зависит от (с)	Зависит от (с)	Гибкая, учитывает различные распределения времени обслуживания	Пропорциональная (с)
Среднее занятое количество каналов	1	С	Гибкое	С
Среднее количество занятых мест в очереди	Заявки мгновенно обслуживаются	Зависит от интенсивности поступления заявок и количества обслуживающих устройств	Может меняться в зависимости от распределения	Значение зависит от интенсивности поступления заявок, количества обслуживающих устройств и характеристик распределения времени обслуживания

Анализ параметров позволяет понять, как различные модели влияют на время пребывания заявок, вероятность их обслуживания, использование каналов связи и эффективность управления очередями. Выбор оптимальной модели зависит от конкретных требований системы и баланса между ресурсами и производительностью. Важно понимать, какие параметры влияют на эффективность таких каналов.

1. Пропускная способность канала: определяет объем данных, передаваемых за единицу времени.

2. Задержка передачи данных: время от источника к приемнику. Минимизация повышает отзывчивость и скорость передачи.
3. Джиттер: изменение задержки передачи данных.
4. Пропускная способность очереди: максимальный объем данных в очереди.
5. Ошибки передачи данных: могут снизить производительность и вызывать повторную передачу.
6. Протокол передачи данных: выбор протокола влияет на скорость, надежность и стабильность связи¹².

В табл. 2 приведен анализ параметров разных моделей систем массового обслуживания.

Таблица 2

Анализ параметров разных моделей систем массового обслуживания

Table 1

Analysis of parameters of different models of queuing systems

Параметр	M/M/1	M/M/c	M/G/1	M/G/c
Пропускная способность канала	Одна единица (примерно 1 Gbps)	В зависимости от (с)	Гибкая	Пропорционально (с)
Задержка передачи данных	Низкая	Варьируется в зависимости от (с)	Может варьироваться из-за неоднородности времени обслуживания	Варьируется в зависимости от (с)
Джиттер	Низкий	Варьируется от модели к модели	Может проявляться в неоднородности времени ожидания и обработки заявок	Варьируется от модели к модели
Пропускная способность очереди	Обслуживается только одна заявка за раз и не возникает очереди	Пропускная способность очереди обычно не является определяющим параметром	Может быть ограничена временем обработки одной заявки и интенсивностью поступления новых заявок	Зависима от количества (с), характеристик времени обработки заявок и наличия ограничений на длину очереди
Ошибка передачи данных	Заявки обслуживаются мгновенно без очереди, вероятность возникновения ошибок передачи данных низкая	При увеличении числа устройств в системе может уменьшаться вероятность ошибок из-за распределения нагрузки	При возможном изменчивом времени обслуживания заявок возможно увеличение вероятности ошибок передачи данных	Может изменяться в зависимости от (с) и характеристик времени обработки заявок
Тип используемого протокола	В основном TCP	Использование различных протоколов в зависимости от специфики обслуживаемых устройств и потребностей сети	Использование различных протоколов в зависимости от конкретных условий, требований системы и возможностей оборудования	Варьируется в зависимости от числа обслуживаемых устройств и требований конкретной ситуации

¹² Компьютерное моделирование. СМО. URL: https://ami.nstu.ru/~gulyaeva/cm/materials/lec1_cm.pdf/ (дата обращения: 19.02.24).

Анализируя эти параметры, можно определить различия между моделями систем массового обслуживания в контексте различных параметров, которые влияют на их эффективность и производительность [10; 11].

Увеличение числа каналов в системе массового обслуживания улучшает производительность и обработку заявок, снижая время ожидания и повышая пропускную способность. Равномерное распределение нагрузки между каналами через оптимизацию позволяет эффективнее использовать ресурсы и предотвращать перегрузки. Оптимальная стратегия должна сбалансировать эффективность обработки и удовлетворенность клиентов [12].

Применение и перспективы

Рассмотрим прогнозирование дальнейшего развития IoT-сетей на основе исследования, проведенного крупнейшим российским оператором связи МТС: к концу 2025 г. около 25 % всех IoT-устройств в России будут подключены через eSIM. Прогнозируются среднегодовые темпы роста рынка IoT в России на уровне 12 % после спада в текущем году. К 2026 г. рынок может достичь объема в 208,5 млрд рублей. Отрасли энергетики, ЖКХ, недвижимости и транспорта останутся в лидирующей позиции по внедрению IoT. К 2025 г. общее количество интеллектуальных счетчиков коммунальных ресурсов в России увеличится до 39 млн. Прогнозируется утроение количества «умных» колонок и почти пятикратный рост устройств умного дома к 2025 г.¹³

Прогнозы показывают ожидаемое развитие сферы IoT в различных частях мира и раскрывают стратегические намерения региональных лидеров в области инноваций и цифровизации.

В США: по прогнозам IDC, к 2023 году глобальный рынок IoT вырастет до 1,1 триллиона долларов, где США будут лидировать по объему IoT-инвестиций. В Китае: Counterpoint Research ожидает, что к 2025 г. Китай станет крупнейшим рынком IoT смарт-устройств в мире. В Европейском союзе: Евросоюз планирует инвестировать более €20 млрд в развитие IoT к 2027 г., что приведет к значительному расширению IoT-сетей в странах ЕС.

Анализ прогнозов указывает на активное развитие IoT-сетей как в России, так и в других странах мира. Увеличение числа подключенных устройств, расширение инфраструктуры и инвестиции в инновации говорят о перспективности этой отрасли в будущем.

Заключение

Применение теории очередей к каналам связи в сетях IoT является перспективной областью исследований, которая может помочь решить ряд актуальных проблем. Быстрый рост устройств IoT приводит к увеличению сетевой нагрузки, что может приводить к задержкам, потере пакетов и снижению надежности сети. Система массового обслуживания может быть использована для анализа поведения этих сетей и разработки более эффективных протоколов связи, которые могут помочь уменьшить эти проблемы. Некоторые из последних технологических трендов, применяемых в исследовании каналов связи:

- 1) исследование с использованием 5G-технологий;
- 2) использование искусственного интеллекта (AI) в анализе каналов связи;
- 3) исследование ультраширокополосных (UWB) технологий;
- 4) применение программно-определяемых сетей (SDN) и сетей функций (NFV).

Однако другая ключевая проблема в сетях IoT заключается в обеспечении справедливости и качества обслуживания (QoS) для разных типов трафика. Например, приложения, которым

¹³ Тренды IoT: что ждет интернет вещей в ближайшие годы. URL: <https://vc.ru/mts/456729-trendy-iot-chto-zhdet-internet-veshchey-v-blizhayshie-gody/> (дата обращения: 19.02.24).

нужно быстро передавать данные почти сразу, например видео- или голосовые звонки, требуют короткой задержки и высокой скорости передачи данных. Но, напротив, приложениям, работающим с данными, передаваемыми не сразу, например отправка файлов или электронных писем, время не так критично. Система массового обслуживания может быть использована для разработки алгоритмов планирования, которые приоритизируют разные типы трафика на основе их требований QoS, обеспечивая доступность необходимых ресурсов для всех устройств и приложений.

Наконец, использование алгоритмов машинного обучения в сетях IoT может приводить к увеличению вычислительной сложности и требованиям к ресурсам. Система массового обслуживания может быть использована для анализа производительности этих алгоритмов и разработки более эффективных стратегий распределения ресурсов, которые могут помочь уменьшить энергопотребление и улучшить производительность сети.

В целом применение системы массового обслуживания к каналам связи в сетях IoT может помочь решить ряд ключевых проблем, включая сетевую нагрузку, обеспечение QoS и распределение ресурсов. Используя принципы системы массового обслуживания, исследователи могут разработать более эффективные протоколы связи, алгоритмы планирования и стратегии распределения ресурсов, которые могут помочь улучшить производительность и надежность сетей IoT.

Список литературы

1. **Ядровская М. В., Поркшеян М. В., Синельников А. А.** Перспективы технологии интернета вещей // *Advanced Engineering Research*. 2021. Т. 21, № 2. С. 207–217. DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-207-217>
2. Методы принятия управленческих решений: Учебное пособие / Под ред. П. В. Иванова. Ростов н/Д: Феникс, 2014. 413 с.
3. **Аль-Днебат Сайд Али.** Применение сетей массового обслуживания для исследования процессов передачи видеопотоков в пакетных сетях: Автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.12.13 / науч. рук. А. Ф. Ярославцев. Новосибирск, 2004. 17 с.
4. **Петухов О. А., Морозов А. В., Петухова Е. О.** Моделирование: системное, имитационное, аналитическое: Учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. 288 с.
5. **Chen Y, Lu L, Yu X, Li X.** Adaptive Method for Packet Loss Types in IoT: An Naive Bayes Distinguisher // *Electronics*. 2019. Vol. 8(2). P. 134. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8020134>
6. **Shi V. T., Nhg D. R.** Channel Estimation Optimization Model in Internet of Things based on MIMO/OFDM with Deep Extended Kalman Filter // *Advances in Engineering and Intelligence Systems*. 2022. Vol. 001(02). P. 822. DOI: 10.22034/aeis.2022.341792.1020
7. **Jewel M. K. H., Zakariyya R. S., Lin F.** On Channel Estimation in LTE-Based Downlink Narrowband Internet of Things Systems // *Electronics*. 2021. Vol. 10(11). P. 1246. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10111246>
8. **Jung J.-Y., Lee J.-R.** Throughput and Packet Loss Probability Analysis of Long Range Wide Area Network // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(17). P. 8091. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11178091>
9. **Abbas, Qamar & Hassan, Syed & Pervaiz, Haris & Ni, Qiang.** A Markovian Model for the Analysis of Age of Information in IoT Networks. *IEEE Wireless Communication Letters*. 2021. DOI: 10.1109/LWC.2021.3075160.
10. **Захарикова Е. Б.** Математические модели сетей массового обслуживания в виде «вход-состояние-выход» // *Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО*. 2012. № 6. С. 188192.

11. **Емельянов А. А.** Модели процессов массового обслуживания // Прикладная информатика. 2008. № 5(17). С. 92130.
12. **Chen, Kevin C. W. and Wei, Kuo-Chiang (John) and Chen, Zhihong** Disclosure, Corporate Governance, and the Cost of Equity Capital: Evidence from Asia's Emerging Markets (June 2003). DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.422000>

References

1. **Yadrovskaya M. V., Porksheyan M. V., Sinelnikov A. A.** Prospects for Internet of Things technology. *Advanced Engineering Research*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 207–217. DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-207-217> (in Russ.)
2. Methods for making management decisions: textbook. Ivanova P. V. (ed.). Rostov na Done, Phoenix publ., 2014, 413 p. (in Russ.)
3. Why IoT Matters in Today's Modern World | Techreviewer. URL: <https://techreviewer.co/blog/why-iot-matters-in-todays-modern-world> (date of application: 02.19.24).
4. **Al-Dnebat Said Ali** Application of queuing networks to study the processes of transmitting video streams in packet networks: abstract of thesis. Dis. Ph.D. Novosibirsk, 2004, 17 p. (in Russ.)
5. **Chen Y, Lu L, Yu X, Li X.** Adaptive Method for Packet Loss Types in IoT: An Naive Bayes Distinguisher. *Electronics*, 2019, vol. 8(2), p. 134. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8020134>
6. **Shi V. T., Nhg D. R.** Channel Estimation Optimization Model in Internet of Things based on MIMO/OFDM with Deep Extended Kalman Filter. *Advances in Engineering and Intelligence Systems*, 2022, vol. 001(02), pp. 822. DOI: 10.22034/aeis.2022.341792.1020
7. **Jewel M. K. H., Zakariyya R. S., Lin F.** On Channel Estimation in LTE-Based Downlink Narrowband Internet of Things Systems. *Electronics*, 2021, vol. 10(11), p. 1246. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10111246>
8. **Jung J-Y, Lee J-R.** Throughput and Packet Loss Probability Analysis of Long Range Wide Area Network. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11(17), p. 8091. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11178091>
9. **Abbas, Qamar & Hassan, Syed & Pervaiz, Haris & Ni, Qiang.** A Markovian Model for the Analysis of Age of Information in IoT Networks. *IEEE Wireless Communication Letters*, 2021. DOI: 10.1109/LWC.2021.3075160.
10. **Zakharikova E. B.** Mathematical models of queuing networks in the form of “input-state-output”. *Economics, statistics and computer science. UMO Bulletin*, 2012, no. 6, pp. 188192. (in Russ.)
11. **Emelyanov A. A.** Models of queuing processes. *Applied informatics*, 2008, no. 5(17), pp. 92130. (in Russ.)
12. **Chen, Kevin C. W. and Wei, Kuo-Chiang (John) and Chen, Zhihong.** Disclosure, Corporate Governance, and the Cost of Equity Capital: Evidence from Asia's Emerging Markets (June 2003). DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.422000>

Сведения об авторах

Малахов Сергей Валерьевич, кандидат технических наук

SPIN-код: 1089-9215

AuthorID: 926021

Якупов Денис Олегович, аспирант

SPIN-код: 8692-1106

AuthorID: 1175874

Осипова Ангелина Алексеевна, студентка

Копылова Дарья Александровна, студентка

Зеленина Екатерина Александровна, студентка

Information about the Authors

Sergey V. Malakhov, Candidate of Technical Sciences

SPIN code: 1089-9215

Author ID: 926021

Denis O. Yakupov, Post-Graduate Student

SPIN code: 8692-1106

Author ID: 1175874

Angelina A. Osipova, Student

Daria A. Kopylova, Student

Ekaterina A. Zelenina, Student

*Статья поступила в редакцию 14.03.2024;
одобрена после рецензирования 11.04.2024; принята к публикации 11.04.2024*

*The article was submitted 14.03.2024;
approved after reviewing 11.04.2024; accepted for publication 11.04.2024*