

УДК 681.3, 621.937:004.942

С. С. С. Нассер, Ю. Т. Лячек, М. С. А. Мутанна
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

М. М. А. Мутанна
Санкт-Петербургский государственный университет

А. Хакимов
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Энергосберегающий алгоритм для технологии LoRa: реализация прототипа

Интернет вещей – это общий термин, описывающий большие взаимосвязанные системы, включая сенсорные сети, обычно использующие беспроводные каналы и поддерживающие фиксированную и мобильную связь. LoRa (Long Range) – популярный стандарт глобальной сети с низким энергопотреблением (LPWAN), разработанный для интернета вещей, обладающий удовлетворительной производительностью и относительно низкой стоимостью. Протокол уровня MAC LoRa – это LoRaWAN (глобальная сеть Long Range), которая является одним из них. LoRaWAN – техническое решение для физического и частично связанного сетевых уровней. В статье предлагается алгоритм для обеспечения качества трафика обслуживания, задержки и потери данных, а также для метода проверки качества трафика. Авторы внедряют прототип для краевых вычислений на основе LoRa. Численные результаты показывают, что предложенная архитектура будет играть ключевую роль в построении частных сетей LoRa.

LoRa, задержка, энергия, прототип, граничные вычисления

В современном мире технологии затрагивают все стороны человеческой жизни. За короткий период произошел небывалый рывок в развитии инфокоммуникационных технологий, что изменило традиционный уклад жизни общества. Информационное общество, где каждый человек имеет доступ к информации, знаниям, а также «генерирует» определенные объемы данных в общую сеть, предъявляет новые требования как к сетевому аспекту вопроса, так и к управлению большими объемами данных, организации сервисов. Как следствие, возникают новые сложные задачи перед сервис-провайдерами. С каждым годом объем трафика, создаваемого устройствами с доступом в Интернет, увеличивается в сотни раз. Если в 2010 г. таких устройств было около 5 млрд, то к 2025 г. прогнозируется, что общее количество устройств интернета вещей (IoT) вырастет до 38 млрд, а к 2030 г. – до 50 млрд [1].

В XXI в. продолжается урбанизация населения. За последние 10 лет рост городского населе-

ния увеличился на 1 млрд, а к 2040 г. прогнозируется более 5 млрд людей, проживающих в городах, что может привести к общему снижению качества и комфорта жизни каждого отдельного человека. Динамика и постоянно растущие потребности современного общества побуждают к постоянному развитию социальной структуры городской среды. Город уже перестал быть просто местом концентрации огромного количества людей.

LoRa – пример технологии глобальных сетей с низким энергопотреблением (LPWAN) [2]. Технология LoRa гарантирует радиопокрытие на очень большой площади, но, как известно, не пригодна для передачи мультимедийных данных вследствие низкой скорости передачи данных.

В данной статье представлена технология LoRa и граничные вычисления. Чтобы преодолеть ограниченную пропускную способность, снизить энергопотребление и задержки, предлагается размещать сервер с LoRa на границе.

Мобильные граничные вычисления (MEC) были введены Группой отраслевых спецификаций (ISG) Европейского института телекоммуникационных стандартов (ETSI) как средство расширения интеллектуальных возможностей на границе сети наряду с более высокими возможностями обработки и хранения. С 2017 г. отраслевая группа ETSI переименовала данный термин в Multi-Access Edge Computing, поскольку преимущества технологии MEC вышли за пределы мобильной связи, а также технологий Wi-Fi и фиксированного доступа. Тем не менее, смена имени позволяет ETSI сохранить аббревиатуру MEC, которая стала широко известной среди заинтересованных сторон в отрасли.

Основополагающим принципом MEC является расширение возможностей облачных вычислений на границе сотовых сетей [3], [4]. Это сводит к минимуму перегрузку сети и улучшит оптимизацию ресурсов, взаимодействие с пользователем и общую производительность сети. Благодаря использованию сетей радиодоступа (RAN) MEC значительно снизит задержки и улучшит использование полосы пропускания, упрощая доступ к сетевым службам как для разработчиков приложений, так и для поставщиков контента [5].

В статье предлагается прототип, состоящий из пользовательских устройств. Как и в случае туманных вычислений, это могут быть всевозможные устройства IoT, например датчики, мобильные телефоны, интеллектуальные транспортные средства, считыватели и т. д., серверы MEC. Узлы или серверы MEC обычно располагаются совместно с контроллером радиосети или базовой станцией. Серверы запускают несколько экземпляров хоста MEC, который имеет возможность выполнять вычисления и хранение на виртуализированном интерфейсе. Серверы MEC игнорируются оркестратором мобильных граничных вычислений, который обрабатывает информацию об услугах, предлагаемых каждым хостом, доступных ресурсах и топологии сети, а также управляет приложениями MEC. Серверы MEC предоставляют информацию в режиме реального времени о самой сети, включая нагрузку и емкость сети, а также информацию о конечных устройствах, подключенных к серверам, включая их местоположение и информацию о сети, ядро сети и публичное облако – облачную инфраструктуру, размещенную в Интернете. По функциям схожа с облачным уровнем туманных вычислений.

Постановка задачи. Технология LoRa подразумевает использование приемопередатчиков с низким энергопотреблением для организации сетей IoT. Известно, что классическая архитектура

сети LoRaWAN состоит из конечного устройства, шлюза и сервера. На сегодняшний день вендоры предлагают следующую архитектуру: оператор находится в датацентре, и по всем точкам сети размещаются шлюзы LoRa и все они соединены посредством виртуального канала MPLS или VLAN до сервера LoRaWAN. Такая архитектура работает идеально, и уже есть практика ввода в эксплуатацию некоторыми операторами. В среднем задержка между шлюзом и сервером составляет 30...40 мс. Результаты исследования показали, что уменьшив эту задержку можно увеличить срок службы аккумулятора LoRa. В описываемой работе предлагается использовать распределенную архитектуру сервера с размещением его «близко» к шлюзам, что уменьшит задержку между шлюзом и сервером до 1 мс. Сервер размещается на MEC. Для проведения эксперимента сервер LoRa был представлен в виде контейнера docker для возможности гибкой установки на MEC host-ax.

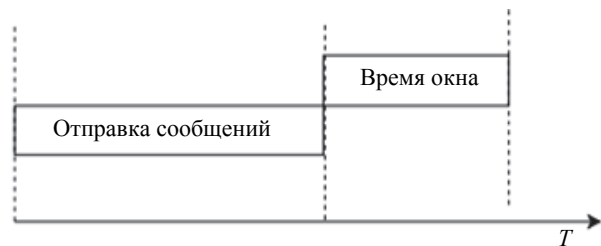


Рис. 1

Из рис. 1 видно, что после того, как конечное устройство отправляет сообщение, оно некоторое время ожидает ответа от сервера. Имеет смысл уменьшить время отклика, закрыв окно приема раньше. Экспериментально получено подтверждение данного предположения и достигнуто снижение потребляемой мощности конечным устройством. Рис. 2 иллюстрирует потребление тока целевым устройством и временное разделение на отправку сообщений.

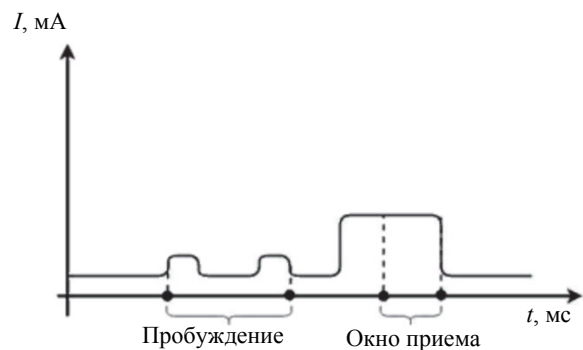


Рис. 2

Сетевая модель. Рассмотрим архитектуру системы для LoRa с учетом энергопотребления, основанную на граничных вычислениях, и прототип для проведения реальных экспериментов с разработанным алгоритмом. Как видно из рис. 3, система состоит из трех уровней: уровня доступа, сетевого уровня и прикладного уровня.

Каждый слой решает свою проблему, вместе они обеспечивают полную систему мониторинга и управления производственными процессами. Уровень доступа состоит из беспроводной сенсорной сети, основанной на технологии передачи данных LoRa. LoRa – это технология широкополосной беспроводной сети с низким энергопотреблением, подходящая для низкоскоростных приложений IoT на больших расстояниях. Преимуществами этой технологии являются низкое энергопотребление и низкие затраты на позиционирование. Несколько других параметров позволяют точно выбрать метод модуляции и технологию LoRaWAN:

- Большое расстояние и низкое энергопотребление: +14 дБм, 868 МГц; до 3.5 км в городских условиях, до 15 км в сельской местности.
- Надежная связь: невосприимчивость к помехам от Bluetooth, WiFi, GSM, LTE и т. д.

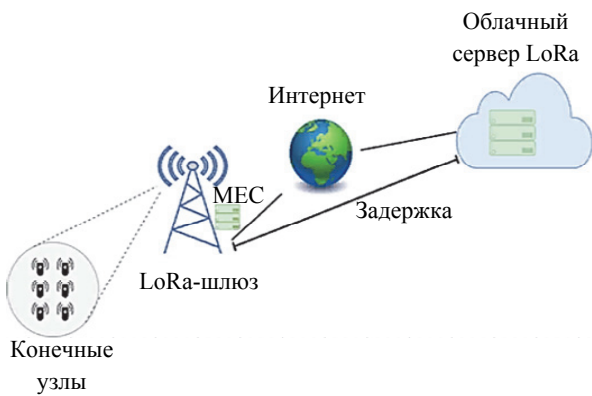


Рис. 3

- Высокая точность геолокации: формат модуляции обеспечивает высокую точность геолокации, не использует GPS-приемник, есть возможность реализовать дополнительные функции.

- Улучшенная емкость сети: возможность подключения большого количества устройств, дополнительная емкость для функций.

В описываемый прототип добавлены граничные вычисления на шлюзе LoRa для распределения ресурсов.

Экспериментальный стенд. Стенд тестирования состоял из элементов 2x SDR NI USRP n2950, развернутой лабораторной сети SDN для создания виртуальных каналов на отрезке шлюз – LoRa-сервер. Один из SDR был использован в качестве шлюза, второй – в качестве конечного устройства. Модернизируя исходный код MyriadRF собрали стенд для тестирования на основе GNURADIO. В качестве LoRa был использован ChirpStack – сетевой сервер в виде докера. Используя искусственный ввод помех в сети имитировали Интернет с доступом к облаку. Параметрами помех были средняя задержка и вероятность потери пакета:

средняя задержка – Normal distribution [avr = 30, $\sigma = 5$] мкс; средняя вероятность потери пакета $p = 0.001$.

Для экспериментов был создан экспериментальный стенд (рис. 4). Предлагаемая структура размещения сетевого сервера LoRa на хостах MEC была реализована без искусственного вмешательства, имитирующего Интернет. Средняя задержка доставки пакетов на сайте сервера шлюза составила чуть более 1 мс. Чтобы доказать эффективность предложенной структуры, измерялось время отклика в конце спектра и аппроксимировались положительные результаты.



Рис. 4

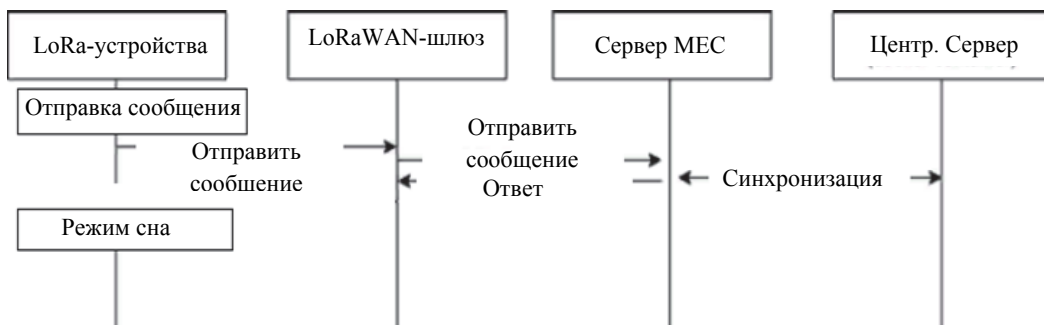


Рис. 5

На рис. 5 приведена диаграмма последовательности действий в предлагаемой системе. Такой метод расположения компонентов LoRaWAN позволяет уменьшить задержку ответа от сервера до конечного устройства, тем самым снизив затраты на энергию конечного устройства.

Оценка результатов.

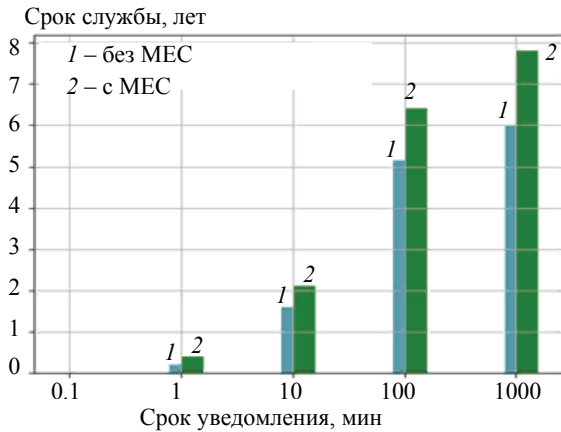


Рис. 6

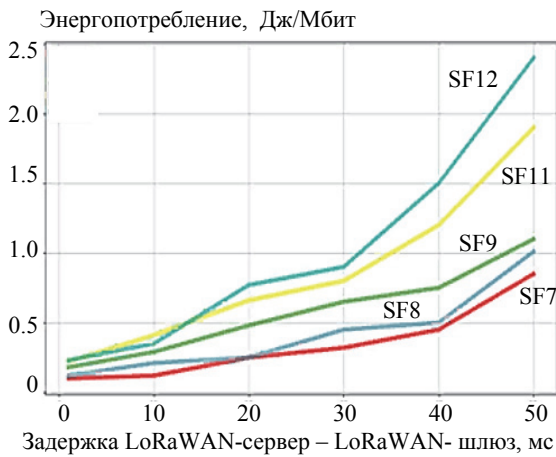


Рис. 7

Результаты тестирования стенда показали, что срок службы конечного устройства с интенсивностью 1 / 1000 мин больше на 1.6 г. для аккумуляторов емкостью 2600 мА·ч (рис. 6).

На рис. 7 показана зависимость энергопотребления от задержки между шлюзом и сервером для ряда коэффициентов расширения (SF). Далее по полученным точкам построили полином Лагранжа (Lagrange Polynomial). Полином Лагранжа работает корректно для точек, расположенных между максимальной и минимальной точками по оси абсцисс, поэтому построили полиномы для всех SF:

$$SF7_L(t) = -1.84 \cdot 10^{-9}t^5 + 3.14 \cdot 10^{-6}t^4 - 0.174 \cdot 10^{-3}t^3 + 0.0032t^2 - 0.0259t + 0.12455;$$

$$SF8_L(t) = 1.25 \cdot 10^{-7}t^5 - 0.146 \cdot 10^{-6}t^4 + 0.00063t^3 - 0.01032t^2 + 0.0759t + 0.055;$$

$$SF9_L(t) = 2.75 \cdot 10^{-9}t^5 - 2.59 \cdot 10^{-6}t^4 + 0.000071t^3 - 0.00041t^2 + 0.0159t + 0.16;$$

$$SF11_L(t) = -7.38 \cdot 10^{-9}t^5 + 9.71 \cdot 10^{-6}t^4 + 0.00034t^3 + 0.0075t^2 - 0.024t + 0.2373;$$

$$SF12_L(t) = -1.98 \cdot 10^{-7}t^5 + 0.251 \cdot 10^{-6}t^4 - 0.0011t^3 + 0.022t^2 - 0.126t + 0.335,$$

где t – задержка между шлюзом LoRaWAN и сервером приложения, мс; $SF7_L(t)$ – $SF12_L(t)$ – энергопотребление конечного устройства, Дж/Мбит.

Используя эти полиномы можно оценить энергопотребление для ввода в эксплуатацию сетей LoRaWAN.

В статье предложены имплементация и прототип эффективного использования сетей LoRaWAN на базе MEC-хостов. Также доказано, что уменьшение задержек на отрезке шлюз – сервер напрямую зависит от длительности работы конечных узлов. Учитывая, что в сетях будущего MEC будет развиваться и станет доступна в большинстве узлов базовых станций, предложенная архитектура будет играть ключевую роль в построении сетей LoRa. В будущих работах планируется изучить эффективность предложенной архитектуры в условиях повышенной и средней коллизии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. General Electric. What is edge computing? URL: <https://www.ge.com/digital/blog/what-edge-computing>. Accessed: (дата обращения Apr. 18, 2020)

2. Powering the IoT through embedded machine learning and LoRa / V. M. Suresh, R. Sidhu, P. Karkare, A. Patil, Z. Lei, A. Basu // 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). Singapore: IEEE, 2018. P. 349–354.

3. Fog computing for sustainable smart cities: A survey / C. Perera, Y. Qin, J. C. Estrella, S. Reiff-Marganiec,

A. V. Vasilakos // ACM Computing Surveys (CSUR). 2017. Vol. 50, №. 3. P. 1–43.

4. A lora-based air quality monitor on unmanned aerial vehicle for smart city / L. Y. Chen, H.-S. Huang, Ch.-J. Wu, Yi.-T. Tsai, Y.-Sh. Chang // 2018 Intern. Conf. on System Science and Engineering (ICSSE). New Taipei, Taiwan: IEEE, 2018. P. 1–5.

5. Mobile edge computing potential in making cities smarter / T. Taleb, S. Dutta, A. Ksentini, M. Iqbal, H. Flinck // IEEE Communications Magazine. 2017. T. 55, №. 3. P. 38–43.

S. S. S. Nasser, Yu. T. Lyachek, M. C. A. Muthanna
Saint Petersburg Electrotechnical University

M. M. A. Muthanna
Saint Petersburg University «SPBU»

A. Khakimov
Saint Petersburg State University of Telecommunications

ENERGY-AWARE ALGORITHM FOR LORA TECHNOLOGY: PROTOTYPE IMPLEMENTATION

The internet of Things (IoT) is an umbrella term describing large interconnected systems including sensor networks, typically exploiting wireless links and supporting fixed and mobile communications. LoRa (LongRange) is a popular Low Power Wide Area Network (LPWAN) standard designed for the IoT, because of its satisfactory performance and relatively low cost. The MAC layer protocol of LoRa is LoRaWAN (LongRange Wide Area Network) is one of them. LoRaWAN is a technical solution for physical and partially connected network layers. The article proposes an algorithm to ensure the quality of service traffic, latency and data loss, as well as to provide an efficient way to consume energy. We are implementing a prototype for edge computing based on LoRa. Numerical results show the proposed architecture will play a key role in building private LoRa networks.

LoRa, latency, energy, prototype, edge computing

УДК 004.942

А. П. Соколов, А. Ю. Першин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Система автоматизированного проектирования композиционных материалов. Часть 2. Вычислительная подсистема, распределенные вычисления с применением графоориентированного подхода*

Описывается вычислительная подсистема, включая ее архитектуру, вошедшая в состав прототипа системы автоматизированного проектирования композиционных материалов (САПР КМ). Проведен обзор литературы и представлены известные программные подходы к созданию наукоемкого программного обеспечения, включая методики реализации вычислительных методов. Обоснована важность применения специальных подходов при разработке сложного наукоемкого программного обеспечения. Сделан акцент на методах разработки расширяемых и сопровождаемых вычислительных библиотек, реализующих сложные вычислительные методы (СВМ). Представлены особенности, отличающие разработку программной реализации СВМ от программной реализации вычислительного алгоритма решения конкретной узкоспециализированной задачи. Приведен перечень требований, предъявляемых к вычислительной подсистеме САПР КМ при ее проектировании, а также принципы, которые легли в основу ее создания. Введено понятие «решатель» и представлены его взаимоотношения с понятиями «функциональный компонент», «вычислительная подсистема», «СВМ» и прочими понятиями системы, введенными в первой части статьи. Детально представлена процедура решения вычислительной задачи, в основе программной реализации которой лежит графовая модель соответствующего СВМ. Приведен состав разработанной вычислительной подсистемы. Представлены принципы разработки библиотек вычислительных функций с использованием графоориентированного подхода. Введено понятие «функция-селектор», а также представлено описание стратегий распараллеливания и ветвления, предполагающих использование таких функций. Представлен пример применения графоориентированного подхода при решении прикладной задачи анализа турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости.

Технологии разработки инженерного программного обеспечения, графоориентированный подход, разработка вычислительных библиотек, автоматизированное проектирование композиционных материалов, система инженерного анализа, разработка модулей расширения, технологии распределенных вычислений, потоко-ориентированные системы, e-science tools

Технологиям создания программного обеспечения (ПО) в целом посвящено огромное множество

материалов, в том числе книги и научные публикации. Одновременно с этим оказывается довольно сложным найти материалы (согласно базам данных РИНЦ и Scopus) по технологиям разработки специ-

* Продолжение. Начало см. в Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 8–9.