

УДК 612. 395

С. А. Аббас, В. В. Чернокульский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Аунг Мьо То

Университет ИТМО

Н. А. Жукова

Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук

Средства моделирования динамических сетей интернета вещей

В настоящее время устройства интернета вещей (ИВ) и их сети становятся все более сложными и динамическими. При моделировании таких сетей разработчики сталкиваются со следующими проблемами: задержкой трафика – часто возникают ситуации, когда данные не могут быть своевременно собраны и обработаны, а также ситуации, когда требуемые данные не могут быть получены; увеличением энергопотребления – из-за мобильности устройства потребляют больше энергии, при этом их ресурсы остаются прежними; проблемы, связанные с безопасностью передачи данных – при динамическом изменении сетевой структуры появляются новые возможности для атак. Для решения этих проблем были проанализированы различные инструменты и протоколы моделирования динамических сетей и маршрутизации данных. В результате разработаны подходящие инструменты и протоколы для повышения безопасности передачи данных и уменьшения задержек трафика, снижения энергопотребления. В ходе моделирования установлено, что производительность представленных инструментов и протоколов лучше, чем у существующих моделей динамических сетей, по нескольким аспектам.

Интернет вещей, инструменты моделирования, мобильные протоколы, динамическая сеть

Сеть интернета вещей (ИВ) представляет собой совокупность мобильных узлов, образующих временную сеть без какой-либо предопределенной инфраструктуры и топологии. Эти узлы с помощью различных методов и средств собирают и объединяют данные от природных объектов с целью определения местоположения, отслеживания, мониторинга и управления различными техническими объектами. Базовая функциональность этих устройств предполагает передачу сенсорных данных на базовую станцию. В настоящее время простые статические устройства вытесняются умными мобильными устройствами. Кроме того, сеть, сформированная мобильными устройствами ИВ, имеет сложную динамическую структуру; топология таких сетей меняется во времени, поэтому сбор данных с мобильных устройств стал достаточно сложен.

Для сбора данных в мобильных сетях ИВ необходимо развернуть протокол маршрутизации.

Чтобы не экспериментировать на реальных сетях, протоколы маршрутизации следует проанализировать с помощью симуляции. Для моделирования этих протоколов или других алгоритмов в проводных и беспроводных сетях используются специальные симуляторы. Симуляции имеют множество преимуществ: простоту реализации, низкую стоимость, анализ в реальном времени результатов, а также других параметров, влияющих на всю сеть. Основная цель данной исследовательской работы – предоставить всеобъемлющий обзор различных симуляторов, которые доступны исследователям для анализа ведущих научно-исследовательских беспроводных сетей.

Оценка производительности сетей. Оценка производительности может быть определена как количественная оценка услуги передачи данных.

Далее рассмотрим параметры, которые влияют на производительность сети.

Мобильность. В настоящее время определение движения узлов и параметров их взаимодействия особенно важно для оценки сети. Базовое определение мобильного узла следующее: это устройство, подключенное к Интернету, которое перемещается вместе с пользователями, поэтому его характеристики зависят от их местоположения, скорости и направления движения в течение определенного периода времени, данные за который такое устройство передает на базовую станцию.

Транспортный поток. Транспортный поток относится ко всем сообщениям и сетевым запросам, генерируемым узлами. Может представлять собой распространение одного сообщения на все узлы в сети или быть системой сложных шаблонов обмена сообщениями, которая напоминает социальные или мобильные приложения обмена сообщениями.

Накладные расходы сети. Это какая-либо комбинация избыточного времени вычислений, памяти, полосы пропускания или других ресурсов, необходимых для выполнения конкретной задачи.

Потребление энергии. ИВ состоит из устройств с низким энергопотреблением. Потребление энергии – важная проблема для ИВ. Чтобы уменьшить энергопотребление, сеть должна быть организована эффективно, т. е. таким образом, чтобы использовать узлы и их энергию для обеспечения эффективной пропускной способности сети.

Меры безопасности. Механизмы обеспечения безопасности должны поддерживать конфиденциальность пользователя, а также общих сенсорных данных, сообщений подтверждения и пр. Данные могут быть собраны устройствами с неограниченными и ограниченными ресурсами. В случае последних из-за ограниченных вычислительных и энергетических ресурсов с установкой механизмов безопасности могут возникать большие проблемы.

Инструменты моделирования. Далее приведен обзор существующих инструментов и платформ моделирования, анализируются их преимущества и недостатки. Анализ призван помочь исследователям в выборе правильного симулятора для разработки алгоритмов, протоколов и методов для беспроводных сетей.

Симулятор сети NS-2. Это симулятор с открытым исходным кодом, который позволяет проводить объектно-ориентированное моделирова-

ние событий. Симулятор предназначен для исследований в области сетевых технологий, которые концентрируются на изучении протоколов моделирования; разработке проводных, беспроводных, спутниковых сетей; исследовании работы TCP, UDP, телетайпа, FTP и веб-сайтов. Позволяет использовать два языка: C++ и OTcl. C++ эффективен для реализации дизайна, но ограничен в возможности визуализации. В NS-2 уровень управления изолирован от уровня обработки данных. Для сокращения времени передачи пакетов и обработки данных планировщик событий и объекты базовых сетевых компонентов написаны на C++. Таким образом, C++ используется для реализации различных протоколов маршрутизации данных, а OTcl – для построения среды моделирования. С помощью NS-2 могут быть реализованы модели распространения радиоволн, модели энергопотребления; симулятор также поддерживает инструменты мобильности, инструменты визуализации и генерации топологии.

Достоинства: 1) позволяет взаимодействовать с реальной системой, поддерживает широкий объем протоколов на всех уровнях; 2) доступно большое количество моделей.

Недостатки: 1) не поддерживает создание методологически обоснованных симуляций; 2) замедляет моделирование при большом количестве узлов в модели (следовательно, не подходит для реализации моделей мобильных транспортных средств).

Симулятор сети NS-3. Позволяет клиенту определять топологию системы, вводить в модель концентраторы и устанавливать соединения между ними. Выполнен на C++ с возможностью импорта модуля языка программирования Python. NS-3 может выступать не только в качестве симулятора, но и эмулятора реального времени, связанного с реальной окружающей средой. Также позволяет использовать несколько существующих стандартов маршрутизации, таких как 802.15.4, 6LoWPAN и RPL.

Достоинства: 1) высокая модульность по сравнению с NS-2, имеет специальную функцию, называемую режимом эмуляции, которая позволяет сетевым администраторам имитировать реальные сети; 2) позволяет вести отзывчивый список рассылки (одна из ключевых особенностей NS-3); 3) поскольку симулятор используют и

улучшают множество разработчиков, на его основе можно создавать адекватные быстро растущие мобильные беспроводные сети, в высокой степени соответствующие реальным.

Недостатки: 1) недостаточно высокая надежность; 2) ограниченная поддержка Python в визуализации.

OMNeT++. OMNeT++, как NS-2 и NS-3, – симулятор проводных и беспроводных сетей. Поддерживает параллельное моделирование распределения данных, а также предоставляет инфраструктуру и инструменты для написания симуляций. Используется в различных областях – в моделировании сетей связи, систем массового обслуживания, протоколов; в оценке аспектов производительности программных систем. Симуляция OMNeT++ работает с несколькими пользовательскими интерфейсами. Графическая анимация пользовательских интерфейсов полезна для отладки и демонстрации перемещения узлов. Пользовательский интерфейс командной строки оптимален для пакетной обработки данных.

Достоинства: 1) симуляция может выполняться в графическом интерфейсе пользователя; 2) поддерживает протоколы MAC, а также некоторые локализованные протоколы в беспроводных сенсорных сетях; 3) имеет специальную среду моделирования для VANET (сеть транспортных средств, от *англ.* Vehicular Ad hoc Networks).

Недостатки: 1) небольшой набор предоставляемых протоколов; 2) нет возможности переноса имитационных моделей в реальные реализации.

MatLab. Простая в использовании среда, где проблемы и решения описываются с помощью знакомых математических обозначений. Написан на языке C и является кроссплатформенным. В MatLab предоставлены различные функции

командной строки, а также инструменты для измерения, анализа и визуализации данных (цифровая фильтрация, обработка и модуляция сигналов и др.). На базе MatLab существует несколько приложений для ученых, инженеров и исследователей для технических вычислений, поэтому с помощью данного симулятора можно разрабатывать алгоритмы цифровой обработки сигналов, моделировать системы и проверять программные и аппаратные реализации.

Достоинства: 1) обеспечивает численный расчет и визуализацию данных; 2) предоставляет инструменты для улучшения качества кода; 3) поддерживает средства для моделирования мобильных сетей.

Недостатки: низкая скорость обработки.

В табл. 1 представлено сравнение рассмотренных симуляторов с открытым исходным кодом.

Протоколы маршрутизации. Далее рассмотрим протоколы маршрутизации, подходящие для улучшения производительности сети.

Протоколы маршрутизации на основе местоположения (географическая маршрутизация). Основной принцип таких протоколов заключается в том, что узел – отправитель данных имеет информацию о местоположениях узлов-получателей. Информация о местоположении может быть собрана различными способами, в частности по беспроводной связи посредством взаимодействия с глобальной спутниковой системой позиционирования (GPS) и спутником, обновляющим информацию о положении узлов, отправляя сигналы на это устройство GPS. Примеры протоколов маршрутизации на основе местоположения: GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [1], GCRP (Greedy Curvmetric-based Routing Protocol) [2], DIR (Data-Intensive Routing Protocol) [3], ROMSGP (Receive on Most Stable Group-Path).

Таблица 1

Симулятор	Область применения	Используемый язык	Доступность	Мобильность	Графическая поддержка	Масштабируемость
NS-2	Беспроводная сеть/ Система ИВ	C++ / OTcl	Беспроводная связь и ad hoc	Поддерживается, но ограниченно	Очень ограниченная	Небольшая
NS-3	Беспроводная сеть/ Система ИВ	C++ / Python	Беспроводная связь и ad hoc	Поддерживается, но ограниченно	Очень ограниченная	Большая
OMNeT++	Беспроводная сеть/ Система ИВ	C++ / NED (NEtwork Description)	Беспроводная связь и ad hoc	Поддерживается	Хорошая	Большая
MATLAB	Беспроводная сеть/ Система ИВ	C++	Беспроводная связь и ad hoc	Поддерживается	Отличная	Огромная

Проактивные протоколы маршрутизации.

В данном типе протоколов маршрутизации каждый узел в случае изменения топологии сети отправляет широковещательное сообщение всей сети для актуализации данных. Это приводит к дополнительным накладным расходам на поддержание актуальной информации о топологии, что может стать причиной задержек передачи данных, повышения энергопотребления и снижения пропускной способности сети. Существуют следующие проактивные протоколы маршрутизации: FSR (Fisheye State Routing) [4], DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) [5], OLSR (Optimized Link-State Routing) [6] и LSR (Link-State Routing) [7].

Реактивные протоколы маршрутизации.

Этот тип протоколов маршрутизации реализуется следующим образом: каждый узел в сети инициирует построение маршрута в момент поступления запроса на передачу данных. Узел-отправитель посылает управляющее сообщение посредством глобальной широковещательной рассылки во время обнаружения маршрута. При обнаружении маршрута учитывается пропускная способность узлов, через которые будут передаваться данные. Реактивные протоколы маршрутизации: SHS-AODV (Secure Hash Algorithms for Ad hoc On-demand Distance Vector) [8], DSR (Dynamic Source Routing) [9], TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm) [10].

Протоколы маршрутизации на основе транспортной инфраструктуры. Данные протоколы для сбора данных используют специальные базовые станции, входящие в транспортную инфраструктуру. Собранные таким образом данные могут быть легкодоступны для транспортных средств, но и использоваться могут только в системе умного транспорта. Протоколы маршрутизации на основе транспортной инфраструктуры: SADV (Static-Node-Assisted Adaptive Data Dissemination in Vehicular Networks) [11], RAR (Roadside-Aided Routing Protocol).

Гибридные протоколы маршрутизации.

Данные протоколы основаны на совместном использовании проактивных, реактивных протоколов (топологическая схема) и протоколов географической маршрутизации (географическая схема). При реализации топологической схемы результативность будет снижаться из-за увеличения размера сети и изменения ее топологии. В географической схеме положения узла назначения и

его соседей учитываются при принятии решений о пересылке. Гибридный протокол реализуется следующим образом: положения узла назначения и его соседей определяются посредством пересылки сообщений, а затем на основе этих данных строится маршрут. Недостаток такой схемы маршрутизации в том, что в протоколе может возникнуть ошибка местоположения при перемещении узла в другое место. Некоторые протоколы гибридной маршрутизации: HLAR (Hybrid Location-based Routing Protocol) [12] и NA-ZRP (Multi-center Adaptive Hybrid based Zone Routing Protocol) [13].

Протоколы маршрутизации на основе кластеризации. Такие протоколы делят узлы на несколько перекрывающихся или изолированных кластеров. В каждом кластере для поддержки узлов – членов кластера выбирается центральный узел. В процессе кластеризации протокол эффективно минимизирует поток трафика во время обнаружения маршрута, а также повышает скорость передачи данных. Более того, методы LEACH-C, R-LEACH, CER-CH и LEACH, основанные на кластеризации, были предложены для снижения энергопотребления, задержек, повышения точности данных в статических сетях. В настоящее время LEACH-M (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy – Mobile) [14], ALEACH-Plus (An Energy Adaptive Clustering Hierarchy protocol – Plus Protocol) [15], WCRA (Weighted Clustering and Routing Algorithm) [16], LEACH-FIS (Improved LEACH Based on Fuzzy Inference System) [17] могут использоваться для сбора данных с мобильных устройств. При решении задач сбора данных эти кластерные методы позволяют снизить сложность взаимосвязей между элементами сети при динамическом изменении ее топологии.

В табл. 2 показано сравнение рассмотренных протоколов маршрутизации.

Оптимальные методы сбора данных в системе ИВ. Перед разработчиками стоит достаточно сложная задача – улучшить производительность мобильной сети в среде ИВ, при этом сохранив хорошую связь и стабильное соединение между устройствами сети и предохранив сеть от атак. Методы кластеризации призваны решить эти задачи. Они позволяют разделить сложную масштабную сеть на сегменты (кластеры), тем самым снижая объем трафика, поскольку центральный элемент каждого кластера будет собирать данные только в своем сегменте (от узлов, входящих в его кластер). Анализ инструментов

Таблица 2

Тип протокола маршрутизации	Протокол	Характеристика				
		Пропускная способность	Накладные расходы	Потребление энергии	Задержка	Меры безопасности
Протоколы на основе местоположения	GPSR	Н	Н	Н	С	–
	GCRP	Н	Н	Н	С	Н
	DIR	С	С	С	С	–
Проактивные протоколы	FSR	–	С	С	С	–
	DSDV	–	С	В	В	Н
	OLSR	Н	С	В	С	–
	LSR	Н	В	В	С	–
Реактивные протоколы	SHS-AODV	С	С	С	Н	В
	DSR	Н	С	С	Н	В
	TORA	С	Н	Н	Н	–
Протоколы на основе транспортной инфраструктуры	SADV	С	С	С	Н	Н
	RAR	С	В	В	С	–
Гибридные протоколы	HLAR	В	В	В	С	Н
	ZRP	С	С	С	С	–
Протоколы на основе кластеризации	LEACH-M	В	Н	Н	Н	–
	ALEACH-Plus	В	Н	Н	Н	Н
	WCRA	С	Н	Н	С	Н
	LEACH-M-FIS	В	Н	Н	Н	–

Примечание: С – средний; В – высокий; Н – низкий; «–» – не определено.

моделирования и протоколов маршрутизации показал, что оптимальным методом моделирования динамических сетей и маршрутизации данных в них является симуляция кластеризации в MatLab.

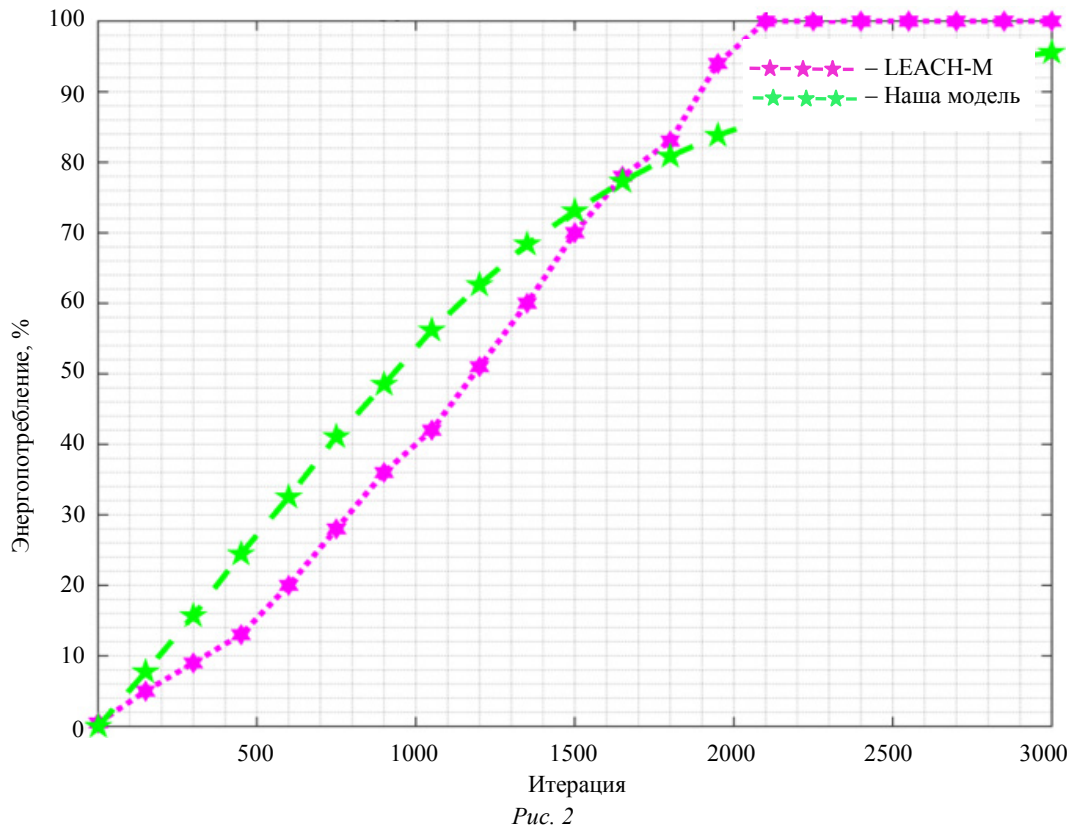
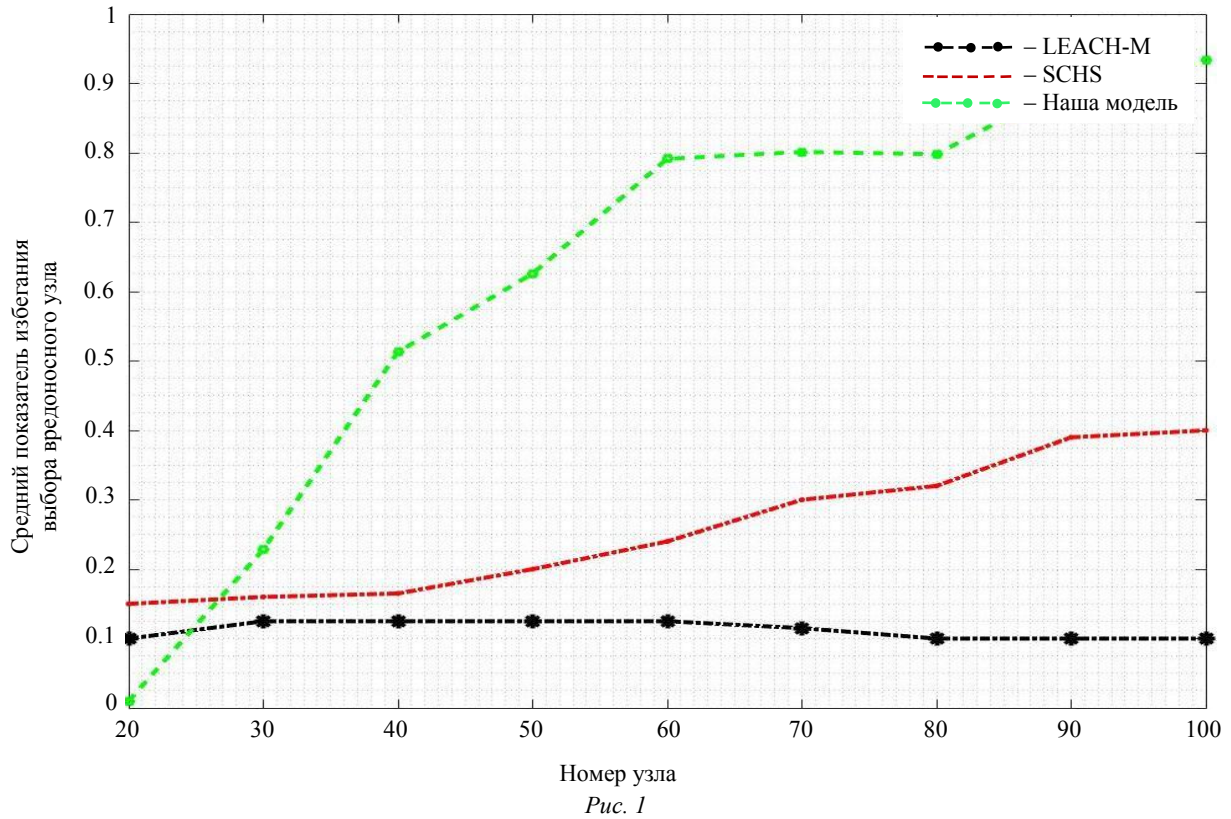
В качестве эксперимента выберем узел стока, который расположен в центре сети, и 300 мобильных устройств с начальной энергией 2 Дж. Мобильные устройства распределены случайным образом и перемещаются в сети размером 300×300 м. Средняя скорость движения узла составляет 1 м/с, а полоса пропускания равна 1 Мбит/с. На этапе настройки каждый узел отправляет данные о своем местоположении и идентификатор узлу стока, который проводит кластеризацию на основе местоположения устройства, срока службы и коэффициента доверия. Изменение местоположения мобильных устройств рассчитывается с помощью модели мобильности случайных точек. По причине мобильности узлов новые центральные узлы кластера выбираются на каждой итерации: кластеризация проводится повторно с помощью метода нечеткой кластеризации С-средних (fuzzy C-mean). Прежде чем выбрать узел центральным узлом кластера, необходимо проверить его достоверность, т. е. определить, является ли узел доверенным или вредоносным в соответствии со

списком контроля доступа и параметрами регистрации. В случае если узел является вредоносным, узел стока (базовая станция) рассчитывает коэффициент проникновения (Intrusion Ratio, IR) на основе полученных и переданных данных. В целях сокращения задержки оптимальный путь выбирается путем отправки сообщения R_{req} от базовой станции. После этого таблица маршрутизации должна быть обновлена для каждого узла. Затем реализуется процедура выбора оптимального пути. Для расчета энергопотребления сети и поиска мертвых узлов используется радиочастотная энергетическая модель первого порядка (The First-order Radio Energy Model). Если энергия узлов меньше предварительно определенного порога, узлы рассматриваются как мертвые.

Результаты проведенного нами моделирования в MatLab сравнивались с результатами, полученными при использовании следующих алгоритмов: SCHS (Secure Cluster Head Selection) [18], LEACH-M [14] и I-Drand [19]. На рис. 1 показан средний показатель избегания выбора вредоносного узла в качестве центрального узла кластера в алгоритмах LEACH-M, SCHS и разработанном нами

алгоритме. Рис. 2 и 3 демонстрируют общее потребление энергии и общее количество живых узлов соответственно в нашем алгоритме по сравнению

с LEACH-M. На рис. 4 показана общая задержка сети нашего алгоритма и алгоритма I-Grand.



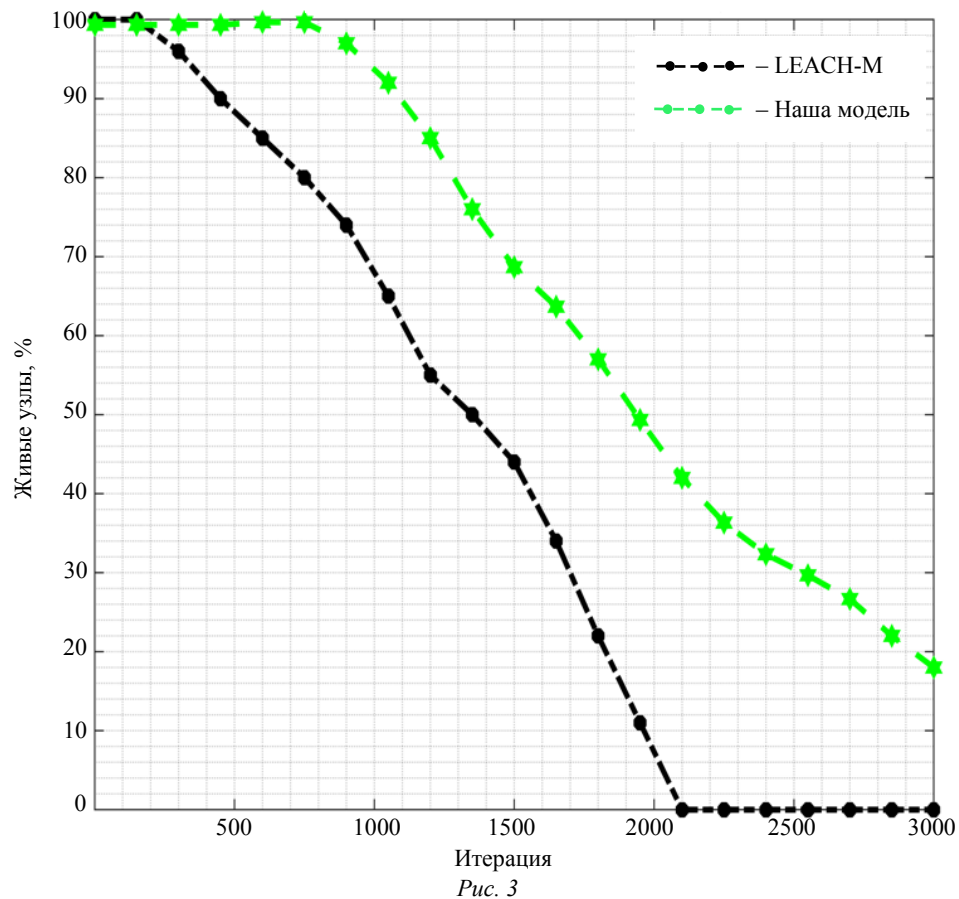


Рис. 3

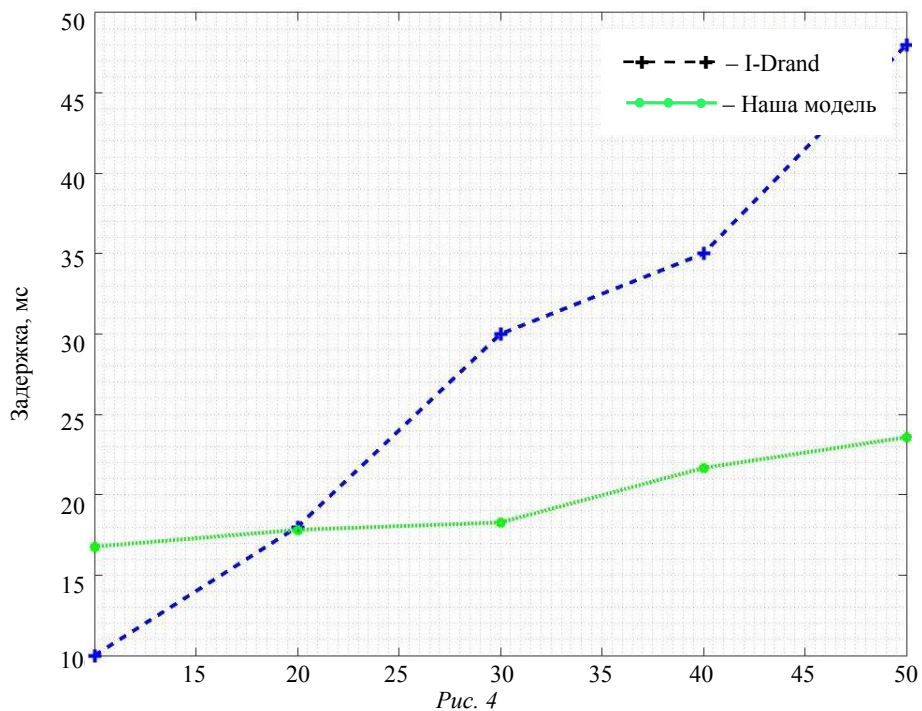


Рис. 4

Динамическая структура сети ИВ страдает от накладных расходов на поддержание топологии, в которой все устройства обмениваются данными. Кластерное сетевое разделение подходит для снижения накладных расходов на обслуживание топологии, поэтому было проведено моделирова-

ние кластерного сбора данных по динамической сети. В результате проведенного анализа описанных методов была показана их эффективность в задачах повышения безопасности, снижения трафика и уменьшения энергопотребления в сети интернета вещей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Of GPSR Protocol in vehicular ad hoc network / X. Yang, M. Li, Z. Qian, T. Di // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 39 515–39 524.
2. Nebbou T., Lehsaini M. Greedy Curvmetric-based Routing Protocol for VANETs // IEEE. 2018. Vol. 2018, № 5. P. 1–6.
3. Sakai K., Sun M.-T., Ku W.-S. Data-intensive routing in delay-tolerant networks // IEEE, 2019. Vol. 2019, № 4. P. 2440–2448.
4. Ding J. Simulation and evaluation of the performance of FSR routing protocols based on group mobility model in mobile ad hoc // IEEE. 2010. Vol. 43, № 2. P. 1–4.
5. Fengjie Y., Hui Y., Ying Z. Research on DSDV routing protocol based on wireless Mesh network // IEEE. 2018. Vol. 2018. P. 4292–4297.
6. Hui Z., Yuan P. S. Analysis and research on OLSR protocol for multi-channel assignment of wireless Mesh network // IEEE. 2017. Vol. 2017. P. 2732–2737.
7. Xu T., Cai Y. LSR: A location secure routing protocol for ad hoc networks // IEEE. 2010. Vol. 2010, № 3. P. 176–185.
8. Kumar R., Tripathi S., Agrawal R. A secure handshaking aodv routing protocol (SHS-AODV) // IEEE. 2018. Vol. RAIT 2018. P. 1–5.
9. A. Secure routing in DSR to mitigate black hole attack // IEEE. 2018. Vol. 1. P. 985–989.
10. Thiagarajan R., Moorthi M. Efficient routing protocols for mobile ad hoc network // IEEE. 2017. Vol. 1. P. 427–431.
11. Ding Y., Xiao L. SADV: Static-node-assisted adaptive data dissemination in vehicular networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2010. Vol. 59, Iss. 5. P. 2445–2455.
12. Luo D., Zhou J. An improved hybrid location-based routing protocol for ad hoc networks // IEEE. 2011. Vol. WiMob 2011. P. 1–4.
13. Yang K., Huang W. Performance research of an improved hybrid routing protocol // IEEE. 2019. Vol. 19. P. 1242–1247.
14. Sharma S., Mittal N. An improved LEACH-MF protocol to prolong lifetime of wireless sensor networks // IEEE. 2018. Vol. 18. P. 174–179.
15. Suwandhada K., Panyim K. ALEACH-Plus: An energy efficient cluster head based routing protocol for wireless sensor network // IEEE, 2019. Vol. 7, № 7. P. 1–4.
16. Singh V., Lohani R. B. Mobility aware energy efficient clustering for wireless sensor network // IEEE. 2019. Vol. 11. P. 1–6.
17. Zhou Y., Zhang H., Zhang L. FIS: An improved LEACH based on fuzzy inference system in MWSNs // IEEE. 2018. Vol. 16, № 9. P. 699–703.
18. Rehman E., Sher M., Naqvi S. H. A. Energy efficient secure trust based clustering algorithm for mobile wireless sensor network // Computer Networks and Communications. 2017. Vol. 1630673. P. 1–8.
19. A distributed TDMA scheduling algorithm for latency minimization in Internet of Things / M. S. Batta, S. Harous, L. Louail, Z. Aliouat // IEEE. 2019. Vol. 19. P. 108–113.

S. A. Abbas, V. V. Chernokulsky
Saint Petersburg Electrotechnical University

Aung yMo Thaw
ITMO University

N. A. Zhukova
St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (SPCRAS)

ANALYSING TOOLS FOR MODELING DYNAMIC NETWORK OF INTERNET OF THINGS

Nowadays, the devices of Internet of Things (IoT) and their networks are becoming more and more complex. When modeling these kinds of network, the developers face security issues, traffic latency, increased power consumption, data and device management issues, and other related problems. To solve these issues, various dynamic network modeling and data routing tools and protocols have been analyzed in this paper. As a result of analysis, suitable tools and protocols have been developed to improve the security and reduce traffic delays, and power consumption when transmitting data.

Internet of things, modeling tools, mobile protocols, dynamic network