

Bluetooth Mesh в IoT

Е. В. Степанова

Аннотация — В работе рассматривается стандарт Bluetooth Mesh, который успешно применяется в Internet of Things (IoT). Для понимания продуктивности создаваемых сетей с использованием данной технологии, анализируется архитектура mesh-сетей, которая позволяет связывать участников сетей в умном доме или целом городе. В статье подробно описаны технические характеристики устройства сетевого протокола: формат сообщений, способы управления сетью, а также протоколы, отвечающие за каждый функциональный уровень. Исходя из свойств и особенностей сетевого протокола, исследуется безопасность создаваемых сетей. Основным конкурентом для технологий Bluetooth всегда являлись технологии из группы Wi-Fi. Для лучшего понимания преимуществ использования Bluetooth Mesh для создания эффективных сетей для IoT, приводится сравнение данного протокола с протоколом Wi-Fi/Wi-Fi Direct. Данные протоколы выглядят взаимозаменяемыми, но каждый имеет свои особенности и поэтому разную спецификацию. Для иллюстрации возможностей и характеристик стандарта Bluetooth Mesh все особенности и свойства рассмотрены на примерах использования в реальных ситуациях. Статья так же знакомит с современными научными работами, нацеленными на изучение эффективного использования данного стандарта.

Ключевые слова — mesh-сеть, ключ сети, пакет данных, узел.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основная цель данной статьи – это ознакомление со стандартом Bluetooth Mesh на базе протокола Bluetooth Low Energy.

В работе представлена информация о характеристиках сети, устройств и пакетов данных, передаваемых в созданных сетях с помощью стандарта Bluetooth Mesh. Рассмотрены архитектура mesh-сетей, способы организации связи и обмена сообщениями, типология узлов, способы управления передачи данных.

II. СОЗДАНИЕ BLUETOOTH MESH

Впервые организация Bluetooth Special Interest Group (SIG) летом 2017 года презентовала формат беспроводного соединения Bluetooth Mesh, использующего технологию многочастотной сети и

предназначенного для устройств интернета вещей (IoT). Данный стандарт основывается на технологии Bluetooth Low Energy (BLE) [1].

Главной целью было создать протокол для беспроводной связи, который имеет низкое потребление энергии, лёгкую масштабируемость и высокую надёжность.

III. ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для доставки сообщения в Bluetooth Mesh можно переключаться между двумя возможными режимами:

Peer-to-Peer и Multipath (message relay). Одноранговая сеть (или “piconet”) подразумевает прямую связь между узлами без посредников, таких как маршрутизаторы. Этот вид связи унаследован от BLE. Данные сети устойчивы к проблеме отказа точек сети. Второй вариант строится на ретрансляции управляемого потока сообщений. Помогает легко разворачивать сети на больших по площади территориях.

Лёгкой масштабируемости способствует малый объем передаваемых сообщений, длина которых может достигать 384 байта, но большая часть помещается в один сегмент размером 11 байт. Данное свойство обеспечивает высокую скорость связи, а также возможность просто поддерживать сеть, включающую в себя большое количество элементов.

Безопасность обеспечивается, уже начиная с создания сети. В процессе инициализации провайдер передает ключ сети и уникальный адрес в пространстве имён. В основе лежит протокол Диффи-Хеллмана с 256-битной эллиптической кривой для создания временного ключа, чтобы зашифровать сетевой ключ и другую информацию. Каждому узлу дополнительно принадлежит свой уникальный ключ, используемый для шифрования сообщений конкретного устройства. Такой ключ получается из эллиптической кривой. Данный криптографический алгоритм дополнительно обеспечивает различные механизмы аутентификации [2][5].

В mesh-сетях возможна обфускация заголовков пакетов, что защищает данные от пассивных атак на сеть, то есть на перехват сообщений в момент ретрансляции. Если пакет отловили, то он не может быть использован для отслеживания использующих его устройства. Обфускация хорошо защищает от атак, основанных на анализе трафика [2].

IV. АРХИТЕКТУРА

Рассмотрим основные принципы организации сети, создаваемой при помощи стандарта Bluetooth Mesh.

A. Передача пакетов

Сообщения в сети, созданной с помощью Bluetooth Mesh, распространяются по принципу лавинной рассылки. Принцип основан на узлах, пересылающих сообщения: каждый узел ретранслирует, который получает сетевой пакет, использует кэширование сообщений для предотвращения ретрансляции недавно полученных сообщений. У каждого сообщения есть адрес источника и адрес назначения. Устройства публикуют сообщения, которые могут предназначаться отдельными объектами / группам / всем объектам одновременно.

В отличие от одноранговой или peer-to-peer (p2p) сети, mesh-сеть позволяет каждому устройству взаимодействовать с любым другим в сети без использования “проводника”. Связь осуществляется путем передачи сообщений, через ретрансляцию другим устройствам по цепочке, таким образом, расширяется дальность связи за пределы диапазона радиосвязи каждого отдельного узла.

К примеру, рассмотрим, как данные транслируются между ячейками, пока не достигнут нужного адресата. Есть задача: изменить температуру термостата в другой комнате, когда вся система в доме управляется со смартфона. Проблема в том, что сигнал напрямую не достаёт до нужного узла (датчика), тогда и проявляется главное достоинство mesh-сети - команда отправляется по цепочке от одного узла к другому. Ретрансляция команды по домашней сети устройств будет вестись, пока не достигнет желаемого устройства. После этого параметр термостата успешно изменится на новое значение. Так в доме создается единая сеть устройств, что позволяет эффективнее и быстрее обмениваться данными. Этот подход экономит энергию устройств, потому что мощность не тратится на передачу пакетов на большие расстояния [3][6].

B. Сообщения

Сетевая архитектура обеспечивает гибкую взаимосвязь элементов, что позволяет передавать и быстро получать актуальную информацию. Для этого важно знать состояние каждого устройства в связанной сети. Рассмотрим на примерах.

Для каждого отдельного устройства существует свой набор характеристик. Возьмём электрическую лампочку как устройство в сети, то одной из ее характеристик будет, горит она или потушена. Или мы хотим заранее позаботиться о температуре в доме, то необходимо получить информацию о градусе в помещении с помощью термодатчика. Свойства могут носить информативный характер на программном уровне - доступны только на чтение (датчики протечки воды),

либо иметь возможность редактирования (полы с подогревом можно выставить желаемую температуру). В соответствии с этим существует три типа сообщений:

GET - запрос состояния узла;

SET - изменение состояния узла или его параметров;

STATUS - сообщение-ответ на GET и SET.

Важным полем в метаинформации сообщения является TTL (Time To Live). Фактически это “время жизни” сообщения равное количеству пересылок сообщения (“прыжков” - hops) между устройствами во время ретрансляции. Основное предназначение данного поля - избежать заикливания пересылки пакета в сети. TTL представлено целочисленным значением от 0 и более. Если TTL равно 4, то при передаче пакета следующему узлу отправитель уменьшит значение поля на 1 ($TTL_{new} = TTL - 1 = 4 - 1 = 3$). Когда значение поля станет равным 0, то ретрансляция данного сообщения прекратится. Ещё для предотвращения повторной ретрансляции сообщений используется кэширование ранее полученных сообщений [2][5].

C. Узлы

В сети существует устройство, обладающее функцией регистратора, обычно это смартфон или планшет. Все остальные устройства называются узлами сети. С помощью регистратора происходит инициализация новых узлов: передача ключа сети, присвоение адреса сети.

Узлы в сети обмениваются сообщениями друг с другом, но процесс передачи и отправки может отличаться в зависимости от возможностей и задач узла. Существует следующий набор свойств [5]:

Relay - узлы ретрансляции, служащие для получения и передачи сообщений.

Low Power - узлы (LPN - Low Power Node), имеющие низкий уровень потребления энергии (батарея или малый аккумулятор). Они экономят заряд тем, что отправляют данные с меньшим промежутком времени или только при особых условиях (повышение температуры больше порогового значения). Если существует потребность в получении обновлений и сообщений, то это происходит с помощью узлов Друзей (Friend Node). Они сохраняют сообщения, которые предназначаются LPN до тех пор, пока LPN не запросит данные самостоятельно.

Proxу - узлы снабжённые прокси-протоколом и интерфейсом GATT (General Agreement on Tariffs and Trade), что позволяет преобразовывать пакеты данных полученные от устройств не поддерживающих Bluetooth Mesh. Многие устройства имеют только BLE и прокси-узлы помогают им взаимодействовать в новых mesh-сетях.

D. Стек протоколов

Bluetooth Mesh - это сетевой протокол, в котором в качестве функционального ядра используется стек протоколов BLE. Как определено в спецификации Mesh Profile [5], протокол Bluetooth Mesh представляет многоуровневую архитектуру. Каждый уровень имеет свои собственные функции и обязанности. Он предоставляет определенные услуги вышестоящему уровню [10].

Функции каждого из слоёв описаны в таблице 1.

Стек протоколов	Функциональность
Уровень моделей (Models Layer)	Определяет стандартные модели приложений, к примеру, сенсоры.
Уровень основных моделей (Foundation Models Layer)	Определяет модели для настройки и управления mesh-сетью.
Уровень доступа (Access Level)	Определяет формат данных приложения, контролирует шифрование / дешифрование данных, поддерживает сетевой контекст и ключи приложения.
Верхний транспортный уровень (Upper Transport Layer)	Обеспечивает шифровку/дешифровку и аутентификацию данных приложения. Отвечает за транспортные сообщения (heartbeats и сообщения для “дружеской” связи).
Нижний транспортный уровень (Lower Transport Layer)	Управляет сегментацией сообщений и повторной сборкой транспортных пакетов.
Сетевой уровень (Network Layer)	Определяет адресацию транспортных сообщений, правила ретрансляции /приема /отклонения, формат сетевых сообщений.
Канальный уровень (Bearer Layer)	Определяет, как обмениваться сообщениями между узлами с использованием каналов ADV (Advertising) и GATT.
Уровень BLE (Bluetooth Low Energy)	Полный стек BLE.

Таблица 1

E. Управление сетью

В сети каждый узел получает сетевой ключ (NetKey) при инициализации в сети, который распределяет регистратор. Данный ключ превращает устройство в составляющую сети. NetKey позволяет создать приватный ключ и ключ шифрования. С помощью ключа NetKey узел аутентифицируется и

расшифровывает сообщения, а также выполняет определенные сетевые функции - ретрансляцию. Но расшифровку данных приложений невозможно выполнить, имея только NetKey.

Для этого существуют ключи приложений (AppKey), которые позволяют передавать и расшифровывать сообщения только для определенных приложений. Каждый ключ принадлежит своей группе приложений: освещение, терморегуляция и др.

Для безопасности данных возможно выделять подсети со своими NetKey. Изолирование информации в подсети пригодится в больших и сложных сетях. Например, в отелях каждый номер со всеми датчиками света и обогрева создает свою локальную сеть.

Существует ещё один особый тип ключа приложения – это ключ устройства DevKey. DevKey уникален для каждого узла сети, известен только регистратору сети и никому другому. Задача данного ключа, заключается в подготовке обеспечения безопасной связи между регистратором и узлом [2].

V. СРАВНЕНИЕ

Если ознакомиться с разнообразием протоколов предлагаемыми на рынке, то можно найти прекрасные варианты возможные помочь в создании сети для IoT: Zigbee, Thread, Z-Wave. Каждый из названных протоколов имеет уникальные характеристики и преимущества, в зависимости от приложения и варианта использования, но в основном они схожи с Bluetooth Mesh. В доме можно найти другой протокол – Wi-Fi Direct, которым оснащены современные устройства, его параметры в скорости и дальности передаваемых данных, энергопотреблении и структуре сети отличаются от Bluetooth Mesh.

A. Технические характеристики

Сравним технические характеристики двух протоколов. Устройства Bluetooth потребляют меньше энергии в сравнении с Wi-Fi. Основная причина разницы – в мощности посылаемых сигналов. Обе технологии излучают сигнал с частотой 2,4 ГГц. Сигналы Bluetooth устройств могут проходить около 10 метров, но в BLE уменьшено потребление энергии за счёт замедления передачи сообщений 2-3 раза и дальности передачи. В то время как дальность сигнала от Wi-Fi больше чем в 10 раз. Чтобы обеспечить передачу на такие расстояние, необходимо больше энергии, поэтому Wi-Fi требует в 10 раз больше энергии, чем Bluetooth, при одних и тех же задачах. Устройствам Wi-Fi требуется значительная мощность для работы – около 500 мВт для десяти сообщений в день, при этом BLE потребляет всего 50 мВт.

B. Особенности пакетов данных

Создавая mesh-сеть можно успешно решить проблемы дальности передачи пакета. За счёт большого

количества равноправных элементов в сети, можно быстро доставить пакет нужному адресату. При этом путь, вероятнее всего, будет не один, что решит проблему внезапного отключения или сбоя одного из элементов в цепочке.

Wi-Fi Direct хоть и имеет большую дальность передачи при р2р, но при этом сконфигурировать ячеистую сеть труднее. В основном создаваемые сети имеют топологию “звезды”, когда есть главный узел транслятор и много получателей. Если выйдет из строя точка доступа, которая в данный момент является транслятором, то понадобится время, чтобы выбрать нового вещателя и переключить остальные устройства на новую точку [11][12].

Сети Bluetooth Mesh обладают малой мощностью и низкой пропускной способностью, но в этом их преимущество для сетей IoT. Mesh-сети предназначены для перемещения небольших пакетов данных: данные для настройки узла или команды. Команда: «выключить» или «включить» термонагреватель, или проверка – выключен ли свет на кухне, не требуют больших мощностей от узлов.

Wi-Fi Direct мощнее и быстрее, но потребляет больше энергии, как следствие, его сложнее настроить. На первый взгляд протокол похож, но при ближайшем рассмотрении он занимает другую нишу. С высокой пропускной способностью Wi-Fi Direct особенно подходит для таких операций, которые требуют кратковременной отправки большого объема данных. Лучшие возможные применения протокола – совместное использование файлов или получение потоков мультимедиа в хорошем качестве в реальном времени [13].

С. Структура сети

BLE предлагает два режима связи между устройствами: режим рекламы или режим с установлением соединения [2].

Рекламный режим работает таким образом, что одно или несколько устройств становятся вещателями (broadcaster/advertiser) и передают информацию по каналам связи с определенным интервалом. В то время как другие устройства - сканеры (scanner) проверяют поочередно каналы вещания, чтобы получить отправленную информацию.

Режим с установлением соединения имеет другой алгоритм. Одно устройство становится центральным (master) и управляет соединениями с несколькими периферийными устройствами (slave). Ведущее устройство управляет и синхронизирует эти соединения.

Если говорить из соображения безопасности, то режим с использованием рекламного вещания подходит лучше. Общение происходит посредством рассылки пакетов, которые предназначены для идентификации устройства. Процесс идентификации предшествует созданию устойчивого соединения и имеет информацию

только об узле в сети (имя и другое). Если соединение не образовывается, то прямого доступа на устройство нет, следовательно, узел в безопасности [4].

С помощью Wi-Fi Direct тоже можно организовать передачу информации без создания устойчивого соединения, для этого используют дополнительное поле информации в режиме представления (advertising).

VI. ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследований показали, что производительность Bluetooth Mesh невысока и в значительной степени зависит от помех от других сетей. Используя данные, собранные в реальной офисной среде, было изучено влияние помех WLAN. Bluetooth Mesh уязвим для внешних помех даже при реализации стандартизированного ограничения использования частотных каналов BLE. Масштабируемость для Bluetooth Mesh является особенно сложной задачей, поскольку она подвержена широкополосному шторму, что снижает надежность связи для более плотных развертываний. Bluetooth Mesh особенно уязвим при перегрузке сети, так как увеличивается вероятность столкновения пакетов для плотно наполненных сетей на основе лавинной рассылки [7].

С выпуском стандарта Bluetooth Mesh стал доступен общий интерфейс между мобильными устройствами и IoT. Позволяя сотням устройств обмениваться данными друг с другом, Bluetooth Mesh становится практическим техническим решением для обеспечения связи после бедствия. Существуют концепции сетей экстренной помощи на основе цифровых городов. Преимущество таких сетей заключается в том, что они остаются работоспособными во время бедствий, так как в основном работают без подключения к Интернету. В результате бедствий стандартные способы связи могут быть нарушены, тогда сети экстренной помощи создают свою крупномасштабную связь между устройствами.

Поскольку стандарт Bluetooth Mesh обратно совместим с Bluetooth 4.0, большинство современных мобильных устройств могут присоединиться к такой сети. Никаких специальных аппаратных или программных модификаций не требуется. Мобильные устройства оказались очень полезными во время стихийных бедствий и после них. В сценариях, когда электрическая сеть все еще работает, но инфраструктура связи не функционирует, устройства IoT без батарейного питания могут аналогичным образом помочь уменьшить перегрузку или создать резервную сеть в случае кибератак [8][9].

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За mesh-сетями будущее в организации пространства для жизни людей, следовательно, это будет привлекать внимание ученых и разработчиков. Сейчас виден огромный потенциал и польза от mesh-сетей в

применении для IoT. Протокол Bluetooth Mesh - хороший вариант для создания безопасной, разнородной и функциональной сети.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Bluetooth SIG, "Bluetooth specification version 5.0," vol. 0, 2016, available at <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>.
- [2] Baert M. et al. The Bluetooth mesh standard: An overview and experimental evaluation //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 8. – С. 2409.
- [3] Chang K. H. Bluetooth: a viable solution for IoT?[Industry Perspectives] //IEEE Wireless Communications. – 2014. – Т. 21. – №. 6. – С. 6-7.
- [4] Namiot D. 3GPP D2D Specification and Public Services //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 2. – С. 39-46.
- [5] Bluetooth SIG, "Mesh Profile Version 1.0," 2017, available at <https://www.bluetooth.com/specifications/mesh-specifications>
- [6] "Low Energy: Mesh | Bluetooth Technology Website". www.bluetooth.com. Archived from the original <https://web.archive.org/web/20170901202951/https://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/how-it-works/le-mesh>, Retrieved: May 2021
- [7] Rondón, Raúl, et al. "Understanding the performance of bluetooth mesh: Reliability, delay, and scalability analysis." IEEE Internet of Things Journal 7.3 (2019): 2089-2101.
- [8] Álvarez, Flor, et al. "Bluemergency: Mediating post-disaster communication systems using the internet of things and bluetooth mesh." 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). IEEE, 2019.
- [9] Serval Project [Online]. Available: www.servalproject.org
- [10] Bluetooth SIG, "Bluetooth mesh networking series," available at <https://blog.bluetooth.com/an-intro-to-bluetooth-mesh-part1>
- [11] 9 Differences between Bluetooth and Wifi for the Internet of Things Solutions // Medium URL: <https://quicsolv.medium.com/9-differences-between-bluetooth-and-wifi-for-the-internet-of-things-solutions-f625e08c0aa2> , Retrieved: Nov 2021
- [12] BLE vs Wi-Fi: Which is Better for IoT Product Development? // CABOT URL: <https://www.cabotsolutions.com/ble-vs-wi-fi-which-is-better-for-iot-product-development/> , Retrieved: Nov 2021
- [13] In a world saturated in Wi-Fi, there's still room for Bluetooth Mesh // Digitaltrends URL: <https://www.digitaltrends.com/computing/bluetooth-mesh-networks> , Retrieved: Nov 2021

Степанова Евгения Владимировна, студент магистратуры факультета Вычислительной математики и кибернетики, Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова, бакалавр, jane-step92@mail.ru

Bluetooth Mesh in the IoT

E. V. Stepanova

Abstract — This paper considers the Bluetooth Mesh networking standard which is being successfully applied at the Internet of Things (IoT). To understand how productive networks created by using this technology are, the study analyzes the architecture of mesh networks that allows connecting devices in a smart house system or, even in the whole city. It thoroughly describes the specifications of the networking protocol: message format, network management, and also protocols responsible for each functional level. Then, based on the properties and features of the networking protocol, the security of this technology is explored. Wi-Fi technologies have always been the main competitor for Bluetooth technology. To better understand the advantages of applying Bluetooth Mesh technology in IoT networks, the paper compares this protocol with Wi-Fi/Wi-Fi Direct one. These protocols seem to be interchangeable, but each has its own features and, therefore, different specifications. The study illustrates the properties and features of the Bluetooth Mesh networking standard by considering the application of the protocol in the real cases. It also reviews the latest studies on the efficient application of the standard.

Keywords — meshnet, network key, network packet, node.

REFERENCES

- [1] Bluetooth SIG, "Bluetooth specification version 5.0," vol. 0, 2016, available at <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>.
- [2] Baert M. et al. The Bluetooth mesh standard: An overview and experimental evaluation //Sensors. – 2018. – T. 18. – №. 8. – C. 2409.
- [3] Chang K. H. Bluetooth: a viable solution for IoT?[Industry Perspectives] //IEEE Wireless Communications. – 2014. – T. 21. – №. 6. – C. 6-7.
- [4] Namiot D. 3GPP D2D Specification and Public Services //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – №. 2. – C. 39-46.
- [5] Bluetooth SIG, "Mesh Profile Version 1.0," 2017, available at <https://www.bluetooth.com/specifications/mesh-specifications>
- [6] "Low Energy: Mesh | Bluetooth Technology Website". www.bluetooth.com. Archived from the original <https://web.archive.org/web/20170901202951/https://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/how-it-works/le-mesh>, Retrieved: May 2021
- [7] Rondón, Raúl, et al. "Understanding the performance of bluetooth mesh: Reliability, delay, and scalability analysis." IEEE Internet of Things Journal 7.3 (2019): 2089-2101.
- [8] Álvarez, Flor, et al. "Bluemergency: Mediating post-disaster communication systems using the internet of things and bluetooth mesh." 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). IEEE, 2019.
- [9] Serval Project [Online]. Available: www.servalproject.org
- [10] Bluetooth SIG, "Bluetooth mesh networking series," available at <https://blog.bluetooth.com/an-intro-to-bluetooth-mesh-part1>
- [11] 9 Differences between Bluetooth and Wifi for the Internet of Things Solutions // Medium URL: <https://quicsolv.medium.com/9-differences-between-bluetooth-and-wifi-for-the-internet-of-things-solutions-f625e08c0aa2>, Retrieved: Nov 2021
- [12] BLE vs Wi-Fi: Which is Better for IoT Product Development? // CABOT URL: <https://www.cabotsolutions.com/ble-vs-wi-fi-which-is-better-for-iot-product-development/>, Retrieved: Nov 2021
- [13] In a world saturated in Wi-Fi, there's still room for Bluetooth Mesh // Digitaltrends URL: <https://www.digitaltrends.com/computing/bluetooth-mesh-networks>, Retrieved: Nov 2021