

"Голубой зуб" над голубой планетой

А. ГОЛЫШКО, канд. техн. наук, г. Москва

*"Иногда нужно обойти весь мир,
чтобы понять, что клад зарыт у твоего
собственного дома".*

Паоло Коэльа

Как отметили многие профильные СМИ, весной 2024 г. американский космический стартап Hubble Network сообщил, что их спутник первым в мире установил Bluetooth-соединение с поверхностью Земли, находясь над ней на орбите высотой около 645 км. Пресс-служба компании рассказала о своём достижении 29 апреля 2024 г. на официальном сайте.

Поскольку в центре этого события оказалась беспроводная технология Bluetooth, разработанная более 25 лет назад для связи различных устройств на расстояниях не более 10 м, журнал просто не мог пройти мимо. Но сначала немного о самой технологии, интерфейсе и стандарте, которые за время своего существования претерпели множество изменений и о которых

когда-то уже рассказывалось на страницах журнала.

Bluetooth или "голубой зуб" — это буквальный перевод с английского прозвища короля викингов Харальда I Синезубого, который вошёл в историю как правитель, объединивший враждовавшие датские племена в единое королевство. Под этим подразумевается, что Bluetooth делает то же самое с различными устройствами.

В основе технологии Bluetooth (семейство стандартов IEEE 802.15) лежит метод расширения спектра со скачкообразной перестройкой частоты (FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum). Изначальная версия стандарта разбивала рабочий диапазон радиочастот 2,402...2,48 ГГц на 79 радиоканалов. Устройство 1600 раз в секунду псевдослучайным образом выбирает один из них и передаёт пакеты данных. Устройства, передающие данные одинаковым образом, объединяются в пикосеть. В таких сетях есть два вида устройств: главное (ведущее) и периферийные (ведомые). Протокол Bluetooth поддерживает режим работы standby. Он позволяет сопряжённым устройствам запоминать друг друга и автоматически подключаться заново после выключения или перезагрузки.

С момента появления протокол успел несколько раз обновиться и дорости с версии 1.0 до 5.4. Это было так.

Версия 1.0 появилась в 1999 г. Она не поддерживала анонимное подключе-

ние, требовала обмена адресами между устройствами, а связь часто обрывалась. В версии 1.1 скорость передачи данных доходила до 1 Мбит/с.

Версия 2.0 с поддержкой EDR — Enhanced Data Rate (2004 г.). Скорость соединения — до 3 Мбит/с. По сравнению с первой версией протокола сигнал стал стабильнее, а энергозатраты сократились в два раза. Выпущенная позднее версия 2.1 поддерживала технологию Sniff-Subrating, снижающую энергопотребление Bluetooth-модулей в 3...10 раз в зависимости от устройства.

Версия 3.0 с поддержкой HS, или High Speed, вышла в 2009 г. и использовала два канала для передачи данных. Если требовалось передать небольшие файлы, то использовался энергосберегающий канал со скоростью до 3 Мбит/с, т. е. Bluetooth 2.0, а для передачи больших файлов включался новый HS-канал со скоростью до 24 Мбит/с.

Версия 4.0 (2010 г.) — к старым протоколам был добавлен новый режим с низким энергопотреблением, позволяющий взаимодействовать с малыми датчиками LE — Low Energy. Эта модификация Bluetooth используется в медицинских девайсах, спортивной обуви или тренажёрах. Датчики LE могут работать годами от небольшого источника питания, периодически включаясь для отправки данных на ведущее устройство. В четвёртой версии Bluetooth также появилось 128-битное AES-шифрование, повышающее безопасность передаваемых данных.

Версия 5.0 (2016 г.) — скорость передачи данных увеличилась до 48 Мбит/с. На конец 2023 г. актуальная версия стандарта — 5.4.

В версиях, начиная с Bluetooth 5.2, появилось несколько новых сопутствующих технологий:

- Enhanced Attribute protocol (EATT) обеспечивает дополнительное шифрование передаваемых данных;

- LE Power Control позволяет регулировать мощность передатчиков в устройствах, адаптируя их к расстоянию между ними;

- LE Isochronous Channels используется в беспроводных головных телефонах и аудиосистемах. Позволяет синхронизировать проигрывание музыки на нескольких устройствах одновременно.

Скорость передачи данных в Bluetooth определяется версией протокола и расстоянием между устройствами. К примеру, версии 5.0 и старше поддерживают передачу данных со скоростью до 48 Мбит/с, что вдвое больше, чем в версии 4.0. Но чем больше дистанция, тем медленнее соединение.

В зависимости от расстояния Bluetooth-датчики делятся на три класса:

Первый класс способен поддерживать устойчивую связь на расстоянии 100...200 м. В бытовых устройствах встречается редко и используется на промышленном оборудовании.

Второй класс удерживает стабильную связь на расстоянии 10...20 м. Такие датчики чаще всего установлены в смартфонах или планшетах.

Третий класс наименее мощный и подходит для объединения устройств на расстоянии до 5 м. Устанавливается на небольших гаджетах, например, фитнес-браслетах, умных часах и так далее.

Упомянутое выше большое число изменений Bluetooth включало в себя:

- быстрое подключение и обнаружение;

- увеличение скорости передачи данных;

- повышение стойкости к радиопомехам;

- повышение защищённости соединения и др.

В истории развития этой технологии реальным скачком стала версия Bluetooth 4.0, в которой был представлен Bluetooth с низким энергопотреблением (BLE). Из его названия понятно, что это точно пригодится для Интернета вещей (IoT, Internet of Things). До появления BLE на рынке активно развивался Bluetooth Classic (BR/EDR), который используется в беспроводных громкоговорителях, автомобильных информационно-развлекательных системах и головных телефонах.

На самом деле существует большая разница между "классическим" Bluetooth и Bluetooth с низким энергопотреблением с точки зрения технических спецификаций, реализации и типов приложений, для которых они предназначены. Кроме того, они несомненно друг с другом.

Функционал BT classic:

- используется для потоковых приложений, таких как трансляция аудио- и видеоконтента и непрерывной передачи данных;

- не оптимизирован для низкого энергопотребления, но поддерживает большую скорость передачи (максимум 3 Мбит/с);

- использует 79 радиоканалов;
- обнаружение происходит в 32 каналах.

Функционал BLE:

- используется в сенсорах и для управления устройствами и приложениями, не требующими передачи больших объёмов данных (максимум 2 Мбит/с);

- предназначен для применения в малопотребляющих устройствах с большими интервалами между передачей данных;

- использует 40 радиоканалов;

- обнаружение происходит в трёх каналах, что приводит к более быстрому обнаружению и установке соединения.

Недавно Bluetooth SIG завершила разработку спецификации Bluetooth LE Audio, которая позволит сделать беспроводные аудиоустройства более энергоэффективными, поскольку они будут использовать BLE вместо BT classic.

Bluetooth Special Interest Group (SIG) — это группа компаний, которые работают вместе над развитием и продвижением технологий, позволяющих осуществлять беспроводную связь между устройствами с небольшим радиусом действия. К таким устройствам относятся смартфоны, планшеты, ноутбуки, компьютеры, принтеры и другие.

В BT classic все устройства в сети, образующие пикосеть, делятся на ведущие (master) и подчинённые (slave).

Основные принципы:

- обмен информацией может осуществляться только между ведущим и подчинённым устройствами, при этом каждое устройство может быть как ведущим, так и подчинённым;

- основным элементом организации сетей Bluetooth является пикосеть, состоящая из одного ведущего устройства и от одного до семи активных подчинённых устройств;

- в одну пикосеть может входить неограниченное число устройств, находящихся в неактивном режиме;

- подчинённое устройство может общаться только с ведущим, причём только тогда, когда это разрешает ведущее устройство;

- в каждый момент времени обмен данными может идти только между двумя устройствами в одном направлении;

- любое устройство одной пикосети может также входить в другую пикосеть в качестве как подчинённого, так и ведущего.

BLE также поддерживает упомянутую выше модель пикосети BT classic. Но даже тут BLE привнёс свои нововведения. Это новая топология сети Mesh. Цель Mesh — увеличение дальности связи сетей BLE и обеспечение поддержки индустриальных приложений, использующих технологию BLE. С Bluetooth Mesh устройства могут работать в ячеистой топологии по схеме "многие ко многим".

Топология mesh-сети даёт два важных преимущества:

- увеличенная дальность связи;

- участники сети могут ретранслировать данные для передачи устройствам, находящимся на большем расстоянии от передатчика, размер сети и число устройств в них могут быть значительно увеличены;

- способность сети к самовосстановлению, и если один из элементов сети выйдет из строя, остальные продолжат работу и смогут передавать данные друг другу.

Bluetooth Mesh — это вообще отдельный стандарт со своей спецификацией, стеком протоколов и т. д. Для него в 2017 г. в Bluetooth 5.0 была добавлена спецификация Mesh Profile.

Ячеистую сеть Bluetooth LE отличает от Zigbee и других технологий, в первую очередь, широкоевещательная передача сообщений. В отличие от других беспроводных сетей, основанных на маршрутизации, mesh-протокол BLE использует принцип managed flood (управляемой широковещательной рассылки).

Этот подход предлагает модель одноранговой связи, в которой все устройства взаимодействуют напрямую друг с другом. Управляемая рассылка позволяет обмениваться сообщениями без сложных алгоритмов маршрутизации. Не нужно использовать центральный хаб и можно передавать сообщения нужным устройствам без задержек и сбоев.

Самодостаточность узлов в сочетании с мультитемным обменом сообще-

ниями облегчает масштабируемость ячеистой сети BLE. Можно создавать множество сетей со множеством узлов.

В ячеистой BLE-сети узлы используют для связи модель публикации/подписки. Производители данных — издатели, которые отправляют сообщения группе устройств. Чтобы получить сообщения, устройство должно подписаться на определённый адрес или группу адресов.

Такой тип обмена сообщениями позволяет настраивать устройства BLE mesh для формирования сегментов сети различного масштаба и назначения. В результате технология становится ещё более гибкой и управляемой.

Архитектура BLE mesh имеет многоуровневую структуру, типичную для любой коммуникационной сети:

- верхние уровни обрабатывают текст сообщения;
- средние уровни ответственны за логику и поведение сети;
- нижние уровни осуществляют фактическую передачу сообщений.

В ячеистой сети Bluetooth особое внимание уделяется безопасности. Для всех коммуникаций доступны решения шифрования и аутентификации на основе алгоритмов AES-CMAC и AES-CCM. Ключи безопасности защищают содержимое сообщений и обеспечивают конфиденциальную связь между узлами.

Использование учётных данных безопасности предотвращает несанкционированный доступ к ячеистой сети BLE. Инициализация или добавление устройства в сеть также безопасно. Новому узлу, добавленному в сеть, предоставляются уникальный идентификатор и доступ к ключам безопасности. Ячеистую сеть можно создать, используя практически любой чип Bluetooth LE или микроконтроллер, поддерживающий эту технологию.

Но вернёмся к дальнобойному Bluetooth. Выяснилось, что некоторые передовые умы из пула радиоинженеров уже сравнительно давно вынашивали идею существенного увеличения дальности действия Bluetooth. Дальнобойный вариант был разработан компанией Qualcomm и используется в современных автомобилях. Он позволяет передавать данные между различными устройствами, такими как смартфоны, планшеты, навигаторы и другие.

Как это работает? Дальнобойный Bluetooth использует специальный протокол передачи данных, который обеспечивает высокую скорость передачи информации. Кроме того, он использует антенну с высоким коэффициентом усиления, что позволяет увеличить дальность действия. Благодаря этому дальнобойный Bluetooth позволяет передавать данные на большие расстояния без потери качества связи. Например, если вы находитесь в машине на трассе, вы можете использовать свой смартфон для прослушивания музыки или просмотра фильмов без необходимости подключения к Интернету.

Кроме того, дальнобойный Bluetooth имеет множество других преимуществ. Он обеспечивает более надёжную связь, чем обычный Bluetooth, и может

работать даже в условиях сильных помех. Это особенно важно для водителей, которые часто находятся в движении и могут столкнуться с различными препятствиями на дороге.

Однако не только автомобилями ограничивается его применение. Согласно сообщению журнала Хакер от 5 июля 2007 г., компания Aircable анонсировала в то самое время впечатляющий по своим характеристикам Bluetooth-адаптер Aircable Host XR. Передатчик подключается к USB-порту и способен, внимание, передавать информацию на невероятное расстояние, до 30 (!) км, тогда как отдельные особо дальнобойные и привычные нам Bluetooth-устройства способны работать на расстоянии до 100 м.

Aircable Host XR оснащён двумя антеннами. Первая обеспечивает дальность работы до 1 км (что, согласитесь, тоже неплохо), а вторая — заявленные 30 км! Адаптер совместим с популярными ОС Windows, Mac OS X и Linux. Реклама утверждает, что теперь Bluetooth можно использовать для построения сетей в малонаселённых районах, быстро передавать почтовые сообщения и многое другое. Невысокая стоимость передатчика и простота обращения с известным протоколом гарантируют, что теперь Bluetooth будет использоваться в совершенно новом качестве.

Подключение к ПК и программное (BASIC) управление адаптера промышленного типа осуществляются по интерфейсу RS-232. Aircable Industrial XR оснащается Li-ion батареей большой ёмкости. Помимо этого, дополнительное питание можно получать от солнечных батарей. Внешняя антенна, которая предустановлена, позволяет работать с устройствами ячеистой сети на расстояниях до 1 км. Со всенаправленной антенной радиус действия увеличивается до 2 км, направленная антенна позволит работать на удалении до 10 км, а большая внешняя антенна обеспечит радиус до 30 км.

Устройство можно программировать и настраивать на нужный режим работы. Поддерживаются такие элементы стандарта Bluetooth 2.0: Bluetooth-FTP, Bluetooth-OBEX, Bluetooth-SSP. Это позволит обеспечивать передачу файлов по протоколу FTP, организовать режим работы клиент—сервер между различными устройствами (телефоны, КПК, ПК), поддерживающими стандарт Bluetooth 2.0. Дальнобойный Bluetooth-адаптер Industrial XR оценивается в 299 долл.

Ну а теперь, в 2024 г. дальнобойный Bluetooth работает на расстояниях до 600 с лишним километров. И внедрение космического Bluetooth обеспечит возможность сопряжения различных пользовательских устройств, находящихся на разных континентах. Технология весьма перспективна и для космической отрасли — с её помощью также можно устанавливать каналы связи между спутниками и космическими аппаратами.

В марте 2024 г. инженеры компании Hubble Network запустили на орбиту два спутника в рамках миссии SpaceX

Transporter-10. За пару месяцев компания протестировала передачу данных на дальние расстояния посредством протокола Bluetooth. Внутри спутников были установлены соответствующие чипы Bluetooth размерами 3,5×3,5 мм, а информация удалось передать более чем на 645 км.

Это обновление позволило передавать данные на большие расстояния посредством маломощных сигналов с помощью спутниковых антенн с фазированными решётками. Также специалисты Hubble Network устранили проблемы, связанные с эффектом Доплера и соответствующим сдвигом частот, поскольку данные приходилось передавать между объектами, движущимися на высоких скоростях.

Издание TechCrunch уточняет, что стартап Hubble Network запатентовал также фазированную антенную решётку для небольших спутников, усиливающую в обоих направлениях сигналы Bluetooth. Её действие аналогично действию увеличительного стекла. Подобная антенна способна улавливать с орбиты сигналы Bluetooth, эффективный радиус действия которых может достигать около 1 км.

Представители компании сообщают Hubble Network, что новую технологию можно использовать для быстрой связи со спутниками и другими космическими аппаратами. Технология может найти применение в построении IoT без использования Wi-Fi или наземной мобильной связи.

Bluetooth с возможностью передачи данных на километры можно использовать в смарт-часах для слежения за детьми. В сельском хозяйстве для отслеживания скота, в умных ошейниках для животных, а также в сфере медицины или в транспортной сфере для контроля логистических цепочек. Технология от Hubble Network обещает дать устройствам IoT и вычислительному оборудованию ещё один способ обмена данными, помимо уже привычного широкополосного доступа по проводам, кабелям и эфиру. Как известно, традиционные сети связи часто терпят неудачу. У них наблюдаются проблемы с покрытием в отдалённых районах, подчас они потребляют слишком много энергии и стоят они порой слишком дорого, чтобы эффективно работать в глобальном масштабе. В этом смысле Bluetooth-соединение более энергоэффективно, и на него тратится меньше энергии аккумуляторной батареи.

Фактически Hubble Network заявляет, что её технология может работать на стандартных чипах Bluetooth посредством обновления программного обеспечения (ПО), а не каких-либо изменений в оборудовании. По словам разработчиков, это может дать глобальное покрытие в 20 раз с меньшим расходом энергии батареи и в 50 раз с меньшими эксплуатационными расходами. Собственно, это не просто улучшение, а глобальная трансформация.

В будущем стартап Hubble Network намерен открыть технологию для всех желающих. Компании, которая решит интегрировать этот Bluetooth в свои

продукты, нужно будет оснастить тот или иной гаджет особыми чипами от Hubble Network и подключиться к внутренней сети компании-производителя под названием Hubble. Однако пока компания не раскрыла технических подробностей того, как именно спутники принимают сигналы Bluetooth, а также не упоминает об объёме передаваемых данных или скорости соединения.

По данным Hubble Network, компания уже работает с первыми заказчиками в таких секторах как потребительские устройства, строительство, инфраструктура, цепочки поставок, логистика, нефть и газ и оборона, чтобы изучить возможности использования этой технологии. В 2023 г. стартап Hubble Network привлёк 20 млн долл. за счёт финансирования серии А (это первый значительный этап акционерного финансирования, который стартап ищет у фирм после привлечения первоначального капитала).

Стартап Hubble был основан в 2021 г. Алексом Харо, соучредителем компании Life360, вместе с Беном Уайлдом, основателем и руководителем компании Iotera, и аэрокосмическим инженером Джоном Кимом. Когда Харо впер-

вые познакомили с идеей подключения к спутнику по Bluetooth, он назвал её безумной, особенно учитывая его предыдущий опыт решения этой самой проблемы при попытке создать GPS-часы для детей. Однако решение этой конкретной задачи в конечном итоге стало непреодолимым, особенно потому, что существующие наземные и спутниковые сети часто не справляются со своими задачами, испытывают трудности с покрытием в отдалённых районах и потребляют слишком много энергии, не говоря уже об их высоких эксплуатационных расходах в глобальном масштабе. Собственно, уже рассмотренные на страницах журнала темы связи со спутником с простого смартфона из той же серии.

К имеющимся у компании двум спутникам на орбите в феврале следующего года по плану добавятся третий и четвёртый в рамках миссий SpaceX Transporter-11 и SpaceX Transporter-13. В планах компании нарастить группировку спутников до 32 единиц, что позволит развернуть сеть на уровень полноценной работы к началу 2026 г. Если это случится, то компания рассчитывает на подключение порядка одного миллиарда устройств (по крайней мере,

такие планы были озвучены в рамках раунда привлечения инвестиций).

Вот тогда и увидим, что из всего этого получится.

По материалам

- <https://xakep.ru/2007/07/05/39105/>,
- <https://habr.com/ru/companies/dsec/articles/685514/>,
- <https://skillbox.ru/media/code/chtotakoe-bluetooth-i-kak-on-rabotaet/?ysclid=lwkcrrvdw3726184601>,
- <https://zoom.cnews.ru/news/item/599756?ysclid=lvw4rfbhjs576537830>,
- https://itcrumbs.ru/dalnobojnyj-bluetooth-rabotaet-na-rasstoyanii-do-600-kilometrov_92230,
- https://www.cnews.ru/news/top/2024-05-07_sputnik_vpervye_ustanovil,
- <https://hi-tech.mail.ru/news/109491-sputnik-vpervye-ustanovisoedinenie-s-zemlej-po-bluetooth/>,
- <https://podberitariff.ru/blog/post/589/dalnobojnyj-bluetooth-kak-rabotaet-i-kakie-preimushhestva-imeet/?ysclid=lwksxxzjz900058085>