

УДК 004.031.6

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ

А.О. Беляев, В.В. Кириенко, Д.С. Убирайло

В данной статье рассмотрены основные характеристики технологий описанных в спецификации Bluetooth 4.0. Произведен анализ эффективности каждой технологии для медицинского оборудования с автономным питанием с учетом решаемых задач, основанный на опыте проектирования оздоровительного и медицинского оборудования.

Ключевые слова: Bluetooth Classic, Bluetooth Low Energy, Bluetooth Smart, Bluetooth Smart Ready, медицинское оборудование, автономное питание.

Актуальность

В последнее десятилетие достаточно стремительно развивается рынок носимого оздоровительного и медицинского оборудования как следствие спроса и такого же бурного роста технологий, позволяющих объединить высокое быстродействие вычислительного ядра, компактность датчиков, элементов питания и низкопотребляющие электронные решения. До недавнего времени рынок носимой оздоровительной техники практически пустовал, а эргономике отводилась второстепенная роль. При нынешней ситуации на рынке носимого оздоровительного и медицинского оборудования на первый план выходят два основных аспекта:

- функциональность;
- удобство пользования.

В то время как с первым аспектом ситуация обстоит достаточно определенно: перечень биофизиологических показателей и методы их оценки можно назвать классическими, то обеспечение комфортного съема этих показателей оказалось не простой задачей. Функциональность рассматриваемого оборудования характеризуется не только набором снимаемых данных, но и удобством их представления пользователю (пациенту, врачу или просто пользователю). Все связанные с этим трудности были рассмотрены коллективом НТЦ "Техноцентр" ЮФУ при разработке комплекса автономных устройств для мониторинга биофизиологических показателей [1]: ЭКГ, ЧСС, мощность развиваемая при движении (ходьба, бег). В настоящей статье внимание уделяется задаче обмена информации

между модулями комплекса и внешними потребителями.

Задачи беспроводного информационного взаимодействия

Целью комплекса является съем биофизиологических сигналов: электрокардиосигнал, электромиосигнал, инерциальные сигналы (ускорения и угловые скорости по ортогональным осям). Соответственно проекция решаемых комплексом задач на беспроводную сеть:

- периодический обмен короткими статусными сообщениями (20 байт / 5 сек.);
- редкие аperiodические команды управления (5 байт / 1 час);
- редкие аperiodические запросы фрагментов сигнала (10 кБайт / 1 час);
- продолжительная скоростная передача реализаций биофизиологических сигналов на ПК;
- возможность управления компонентами комплекса со смартфона/планшета.

На предыдущем этапе [1] было определено, что для решения данных задач, наиболее подходящим вариантом является использование технологии Bluetooth. Далее будут даны разъяснения по конкретным аспектам применения данной технологии для разрабатываемого комплекса.

Обзор возможностей и особенностей технологий Bluetooth спецификации 4.0

Для современных медицинских устройств с автономным питанием применение беспроводных технологий для передачи данных и управления становится все более распространенным подходом. Одной из наиболее часто встречающихся в этой области беспроводных сетевых технологий является Bluetooth.

Из-за сравнительно высокой скорости передачи данных и неплохой энергоэффек-

РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

тивности технология Bluetooth получила широкое распространение в мобильных медицинских устройствах. Начиная со спецификации Bluetooth v4.0 [2] стандарт делится на две части Bluetooth Classic, которая включает в себя стандарты Bluetooth 2.0, Bluetooth 2.1 + EDR, Bluetooth 3, и Bluetooth Low Energy (BLE).

В отличие от предыдущих стандартов BLE изначально ориентирован на применение в системах мониторинга с автономным питанием и имеет низкое энергопотребление. Применительно к медицинскому оборудованию это необходимо для обеспечения требуемого времени диагностического наблюдения, а также с точки зрения удобства их использования, потому что прибор сможет дольше работать без подзарядки и смены элементов питания. Низкое потребление BLE обеспечивает возможность создания беспроводных медицинских датчиков. Технология Bluetooth low energy обеспечивает возможность работы таких датчиков от батарейки CR203 до 10 лет.[3] Средний ток потребления BLE-устройства изображен на рисунок 1 [3].

На рисунке 1 представлена структурная схема измерительного канала температуры в составе информационно-измерительной системы, в которой каждый из блоков выполняет определенный процесс. Для реализации интегрального подхода должны быть разработаны модели каждого из процессов, с необходимым набором параметров.

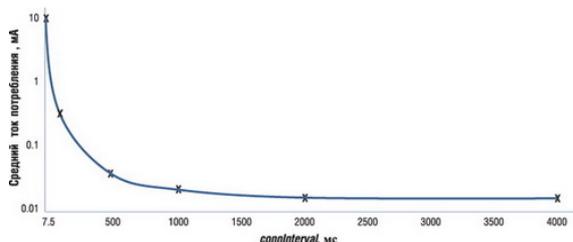


Рисунок 1 - Средний ток потребления BLE устройстве.

Как видно из рассмотренной таблицы, технологии имеют существенные различия. Помимо этого, использование одной из рассмотренных технологий определяет какие профили могут быть использованы. Устройства могут связаться по Bluetooth, если имеют реализацию одного из профилей. Здесь и находятся главные различия двух технологий. Например, технология Bluetooth Classic обеспечивает профиль SPP для эмуляции последовательного порта. А технология BLE согласно спецификации Bluetooth v4.0 не имеет данного профиля. Многие другие про-

фили также не поддерживаются BLE, потому что отличаются моделью подключения. Это такие профили, как HSP, OBEX, A2DP, VDP [2]. В свою очередь профили, основанные на GATT не поддерживаются технологией Bluetooth Classic.

Принимая во внимание то, что некоторые функции контроллера BLE взяты Bluetooth Classic, они не могут связываться между собой, т.е. устройство, поддерживающее только BLE (однорежимное устройство - single-mode device) не сможет взаимодействовать с устройством, поддерживающим только Bluetooth Classic (Bluetooth 1.2/2.x/3.0). Для реализации связи между ними хотя бы одно из устройств должно поддерживать оба стека протоколов (двухрежимное устройство - dual-mode device) [4].

Однорежимные устройства обладают наименьшим потреблением и в основном представляют собой конечные исполнительные устройства. Двухрежимные устройства предполагают возможность периодического получения энергии, располагаются на различных мобильных устройствах, а также могут функционировать и как обычные Bluetooth-устройства. Схема взаимодействия между однорежимными, двухрежимными устройствами и классическими Bluetooth-устройствами представлена на рисунке 2.

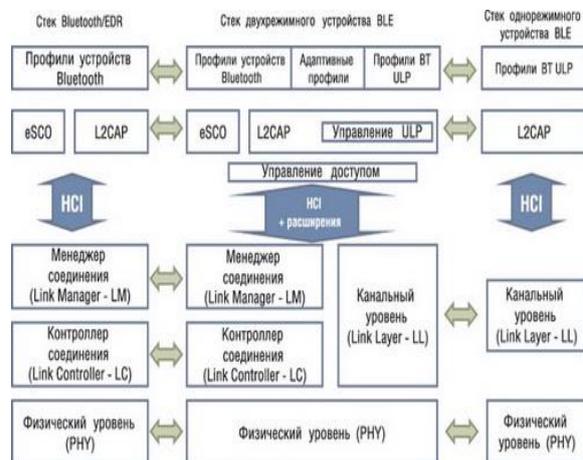


Рисунок 2 - Схема взаимодействия между Bluetooth устройствами.

Из вышеописанных данных следует, что для медицинского устройств самым целесообразным подходом является комбинированное использование однорежимных и двухрежимных устройств, которые вместе покрывают обе технологии Bluetooth Classic и Bluetooth LE. Это позволяет обеспечить совместимость и высокую скорость передачи для одних задач благодаря Bluetooth Classic и

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ

низкое потребление для других, которое обеспечит Bluetooth LE.

Критерии начальной оценки беспроводных решений

При сравнительном анализе различных беспроводных решений с точки зрения их энергоэффективности, общепринятых критериев сравнения, таких как скорость передачи данных, выходная мощность передатчика, чувствительность приемника, протокол передачи данных и т.п., недостаточно, так как они в основном отражают лишь статические характеристики, и не позволяют оценить длительность работы конкретного беспроводного решения в определенных условиях при решении конкретной задачи. Поскольку при проектировании персональной беспроводной сети автономных устройств показатель энергоэффективности является одним из основных, то ему было уделено наибольшее внимание в настоящем исследовании. Частично задача оценки энергоэффективности решалась в работах Jin-Shyan Lee [5,6] и Zhifang Wang [7], в данном исследовании полученные ими результаты дополнены, и с использованием сформулированных показателей выполнена экспериментальная оценка (по данным технической документации) различных беспроводных решений.

Основным требованием к результату исследования является необходимость численной оценки энергоэффективности конкретного беспроводного решения по минимальному количеству параметров, или по некоторому интегральному показателю. С этой точки зрения, для оценки эффективности беспроводных трансиверов (как систем на кристалле, так и модулей) были введены новые показатели, описание которых представлено ниже.

Удельный информационный энергетический коэффициент передатчика (мДж/бит) - показывает количество энергии необходимое для передачи 1 бита полезной информации приходящееся на 1 милливатт выходной мощности. Данный вычисляемый параметр позволяет сравнивать эффективность различных беспроводных решений на уровне протоколов относительно потребляемой энергии, и вычисляется как:

$$p_{TX} = (D_k \cdot k_{\Sigma})^{-1} \times p_{\sigma} \quad (1)$$

где D_k - канальная скорость передачи данных (бит/сек), k_{Σ} - коэффициент эффективности используемого протокола (отношение полезных данных к общему количеству данных в сообщении). Далее для указания канальной скорости будет использоваться размерность бит/сек, а для указания скорости

передачи полезных данных - бод/сек, p_{σ} - удельная потребляемая мощность передатчика (в мВт) (3).

Удельный информационный энергетический коэффициент приемника (мДж/бит) - показывает количество энергии необходимое для приема 1 бита полезной информации:

$$p_{RX} = (D_k \cdot k_{\Sigma})^{-1} \times (U \cdot I) \quad (2)$$

где D_k - канальная скорость передачи данных (бит/сек), k_{Σ} - коэффициент эффективности используемого протокола (отношение полезных данных к общему количеству данных в сообщении). Далее для указания канальной скорости будет использоваться размерность бит/сек, а для указания скорости передачи полезных данных - бод/сек, I - ток, потребляемый при приеме данных (мА), U - напряжение питания приемника.

Удельная потребляемая мощность передатчика (мВт) - мощность потребленная передатчиком, приходящаяся на 1мВт выходной мощности.

$$p_{\sigma} = \frac{U \cdot I}{P} \quad (3)$$

где I - ток, потребляемый при передаче данных (мА), U - напряжение питания передатчика.

Энергоэффективность передатчика - отношение потребленной мощности к мощности излучения. Данный показатель позволяет сравнивать затраты энергии на обеспечение функционирования аппаратной части беспроводного решения, иными словами - какой процент потребленной мощности передается на выход радиопередатчика.

$$КПД = (p_{\sigma})^{-1} \times 100\% \quad (4)$$

Графическая зависимость показателей энергоэффективности различных трансиверов и интегрированных СМК представлена на рисунке 3.

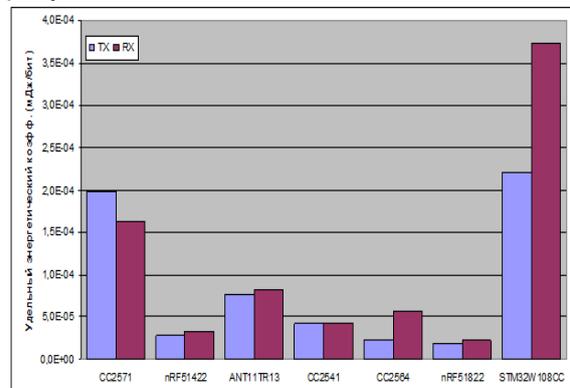


Рисунок 3 - Удельные коэффициенты энергоэффективности

РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Выбор аппаратного модуля и стека протоколов Bluetooth

Из рассмотренных, модули CC2541 и CC2564, согласно рисунка 3, уступают лишь nRF51822, который не имеет готовых модулей, при этом CC2541 имеет структуру не требующую внешнего Bluetooth стека. Самым доступным и наиболее удобным оборудованием на базе СнК CC2541 стал модуль BLE112 [8] представленный на рисунке 4, большое количество доступной документации, примеры применения модуля, а так же руководство к программированию сделали его привлекательным с точки зрения разработки устройств. На сайте TI (Texas Instruments) для используемых СнК CC2541 модулей обозначены два варианта стека: StonestreetOneBT+BLEStack и MindTreeEther-Mind™ Bluetooth® Stack and SDK. Для последнего отсутствует ссылка для скачивания и указано, что для модулей от Texas Instruments CC256x и схожих с ним рекомендуется использовать программное обеспечение от StonestreetOne. [9]



Рисунок 4 - BLE11 (Bluegiga)

Для Bluetooth стека Bluetopia присутствует комплект SDK, доступный на сайте TI. Имеется возможность скачать два варианта: StonestreetOneBT+ BLEStackonTivaC и StonestreetOneBT+BLEStackonMSP430, каждый из них является бесплатным вариантом для загрузки и применения в некоммерческих целях. С использованием данных модулей был произведен двусторонний обмен данными с модулем LED112, того же производителя. Дальнейшая работа с модулями Bluetooth Low Energy (Smart) показала, что не все современные операционные системы поддерживают стек протоколов LE, к примеру Microsoft запустила поддержку начиная с Windows 8, Google - с Android 4.3, при этом большинство устройств не находятся под управлением данных ОС, соответственно концепция комплекса была изменена и основным средством передачи данных стал Bluetooth Classic.

Так как модули CC2541 поддерживали лишь возможности обмена данными только через BLE, необходимо было выбрать новый

Bluetooth модуль с поддержкой обеих технологий, им стал комплект PAN-1323 в который входит микросхема CC2564. (рисунок 5)



Рисунок 5 – Bluetooth модуль PAN1323

К тому же, в связи с тем, за основу встроенного ПО модулей выбрана ОСРВ uC/OS-II выполняющаяся на МК STM32 (ARM Cortex-M3), необходимо портировать стек Bluetopia на эту аппаратно-программную платформу. Однако дальнейший анализ StonestreetOneBT+BLEStack показал, что портирование невозможно без полной покупки стека, поэтому было принято решение перейти на другой бесплатный вариант – btstack - A Portable User-Space Bluetooth Stack от Матиаса Рингвальда.[10]

Согласно BTstack Manual v1.0 новый стек был запущен на микроконтроллере MSP430F5438A при использовании модуля PAN-1323 и был совершен обмен информацией между устройством под управлением Android 4.2 и платой на которой велось тестирование - MSP430 Experimenter board при использовании профиля SPP. Попытки подключить данную систему к ПК оказались неудачными, что связано с тем, что разработчик данного стека ввел поддержку только последовательных H4/H5 соединений.[11,12]

В связи с данными изменениями было принято решения выбрать новый модуль со встроенным стеком, который работает в дуальном режиме, т.е. поддерживает и BTClassic и Bluetooth Low Energy - BlueMod+SR. (рисунок 6).



Рисунок 6 – Модуль BlueMod+SR

Данный модуль имеет небольшие размеры – (17 x 10 x 2.6 мм), дальность передачи до 100 м и интерфейс для связи – SPI. Конфигурирование производится при помощи AT-команд. По умолчанию имеет единственный профиль для BT Classic– SPP, необходимый для высокоскоростной передачи данных между устройствами. Передача в режиме пониженного энергопотребления может быть

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2, 2014

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ

произведена через встроенный терминал ввода/вывода построенный на подобие профиля SPP для BT Classic, однако имеется возможность для использования стандартного GATT профиля. [13]

Выводы

Для решения поставленных задач по обеспечению беспроводного обмена данными внутри комплекса и его управления, с точки зрения энергоэффективности наиболее подходят решения Bluetooth Low Energy несмотря на специфику протокола и очевидные трудности с потоковой передачей данных. С другой стороны Bluetooth Classic имея значительно худшие показатели по энергопотреблению предоставляет возможность как потоковой передачи, так и протоколы обмена объектами данных (OBEX) так и протокол SPP наиболее удобный для реализации протоколов прикладного уровня для обеспечения функционирования комплекса.

Рассмотренные решения позволяют сделать вывод, что отсутствие поддержки популярными ОС стека протоколов Bluetooth 4.0, а так же необходимость редкой передачи потоковых данных требуют применения двухрежимных модулей и минимального набора протоколов: SPP + GATT.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта "Создание высокотехнологичного производства по изготовлению мобильного многофункционального аппаратно-программного комплекса длительного кардиомониторирования и эргометрии" по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились во ФГАОУ ВПО ЮФУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

5. Беляев, А.О. Критерии выбора архитектуры беспроводной сети мобильных диагностических систем [Текст] / А.О. Беляев // Ползуновский вестник. - 2013 г. - №2. - с. 114-116.
6. Bluetooth Core Specification 4.1 [Электронный ресурс] / Bluetooth SIG. - Режим доступа: <https://www.bluetooth.org/en-us/specification/adopted-specifications>, свободный - Загл. с экрана. - Яз. англ.
7. Каланчев, А. Для мобильных стражей: беспроводной стандарт Bluetooth Low Energy в системах безопасности [Электронный ресурс] / А. Каланчев // Новости электроники, №1. - 2013 г. - Режим доступа: <http://www.compel.ru/lib/ne/2013/1/3-dlya-mobilnyih-strazhey-besprovodnoy-standart-bluetooth-low-energy-v-sistemah-bezopasnosti> - Загл. с экрана. - Яз. рус.
8. Nilsson, R. Bluetooth Low Energy vs. Classic Bluetooth: Choose the Best Wireless Technology For Your Application [Электронный ресурс] / R. Nilsson, B. Saltzstein - Режим доступа: <http://www.medicalelectronicdesign.com/article/bluetooth-low-energy-vs-classic-bluetooth-choose-best-wireless-technology-your-application>. - Загл. с экрана. - Яз. англ.
9. Jin-Shyan Lee. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi [Электронный ресурс] / Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su, and Chung-Chou Shen // The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) Taipei, Taiwan: 2007. - Режим доступа: http://eee.guc.edu.tw/announcements/comparative_wireless_standards.pdf, свободный - Загл. с экрана. - Яз. англ.
10. Jin-Shyan Lee. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks [Текст] / Jin-Shyan Lee // IEEE Transactions on Consumer Electronics - 2006. - Том 52, №3 - С. 742-749.
11. Zhifang, Wang. Performance comparison of Bluetooth scatternet formation protocols for multi-hop networks [Текст] / Zhifang Wang, Robert J. Thomas, Zygmunt J. Haas // Wireless Networks-2009. - Том 15, № 2 - С. 209-226.
12. BLE112 Bluetooth Smart. [Электронный ресурс] / Bluegiga Technologies. - Режим доступа: <https://www.bluegiga.com/en-US/products/bluetooth-4.0-modules/ble112-bluetooth-smart>. - Загл. с экрана. - Яз. англ.
13. MindTree EtherMind Bluetooth Stack and SDK. Description. [Электронный ресурс] // Texas Instruments Incorporated. - Режим доступа: <http://www.ti.com/tool/mt-bt-sdk>. - Загл. с экрана. - Яз. англ.
14. Btstack. A Portable User-Space Bluetooth Stack. BluetoothforAll. [Электронный ресурс] // Режим доступа URL: <https://code.google.com/p/btstack>, свободный - Загл. с экрана. - Яз. англ.
15. Btstack. A Portable User-Space Bluetooth Stack. Architecture. [Электронный ресурс] // Development / Debugging. - Режим доступа: <https://code.google.com/p/btstack/wiki/Architecture>, свободный - Загл. с экрана. - Яз. англ.
16. Ringwald, M. BTstack Getting Started. Using MSP430 Examples. [Электронный ресурс] / M. Ringwald, M. Ringwald // Version 1.1. - Режим доступа: <http://bluekitchen-gmbh.com/docs/btstack-gettingstarted-1.1.pdf>, свободный - Загл. с экрана. - Яз. англ.
17. Bluetooth Smart Ready Module. [Электронный ресурс] / Stollmann. - Режим доступа: <http://www.stollmann.de/en/modules/bluetooth-modules/bluemod-sr.html> Architecture, свободный - Загл. с экрана. - Яз. англ.

к.т.н., нач. сектора, Беляев А.О., тел. 8 (8634) 311-143, alexys@pisem.net; нач. сектора, Кириенко В.В., тел. 8 (8634) 311-143, snowball@nxt.rut; инженер, Убирайло Д.С., тел. 8 (8634) 311-143, d.ubiraylo@gmail.com - Научно-технический центр "Техноцентр" ФГАОУ ВПО Южный федеральный университет.