

БЕСПРОВОДНАЯ СЕНСОРНАЯ СЕТЬ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ПРЯМОХАОТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Ю. В. Андреев, А. С. Дмитриев, В. А. Лазарев,
А. И. Рыжов, М. Г. Попов**

*Московский физико-технический институт
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
Москва, Россия
e-mail: chaos@mail.mipt.ru*

Проанализированы требования к беспроводным сенсорным сетям медицинского назначения. Выполнены оценки характеристик беспроводной сети на основе сверхширокополосных (СШП) прямохаотических приемопередатчиков. Исследования экспериментального сегмента сети показали, что СШП прямохаотические сенсорные сети могут быть эффективно использованы для решения задач автоматизации мониторинга пациентов, в том числе для передачи больших объемов данных.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть; сверхширокополосная связь; прямохаотическая система связи; медицинская сеть.

WIRELESS SENSOR NETWORK FOR MEDICAL APPLICATIONS BASED ON ULTRAWIDEBAND DIRECT CHAOTIC TECHNOLOGY

Yu. Andreyev, A. Dmitriev, V. Lazarev, A. Ryzhov, M. Popov

*Moscow Institute of Physics and Technology
Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS
Moscow, Russia*

Requirements to wireless medical sensor networks are analyzed. Performance of the wireless network based on ultrawideband (UWB) direct chaotic transceivers is estimated. Experiments show that UWB chaotic sensor networks effectively solve problems of automatic monitoring of patients, including transmission of high-rate data.

Keywords: wireless sensor network; ultrawideband communications; direct chaotic communication system; medical network.

ВВЕДЕНИЕ

В современной медицине остро стоит проблема организации процесса наблюдения за показателями физического состояния организма (электрокардиограмма, давление крови, пульс, дыхание, температура) пациентов, находящихся на стационарном лечении в больницах и клиниках при минимальном участии медицинского персонала.

Проблема может быть решена при помощи беспроводных сенсорных сетей (БСС), осуществляющих мониторинг основных показателей организма с необходимой частотой снятия данных [1]. В связи с этим в ряде стран интенсивно ведутся работы по созданию БСС медицинского назначения и изучению различных аспектов их применения. Обнаружен ряд проблем, которые необходимо решить для успешного широкого внедрения новой технологии в медицинскую практику. Одной из таких проблем медицинских БСС на основе стандартных узкополосных средств беспроводной связи оказывается пропускная способность коммуникационной сети. Другие проблемы касаются электромагнитной совместимости с электронной медицинской аппаратурой, надежности передачи данных, экологической безопасности, конфиденциальности собираемых и передаваемых данных и др.

Решить эти проблемы призваны СШП БСС, создаваемые на основе принятого в 2012 г. стандарта IEEE 802.15.6 для БСС медицинского и бытового назначения, в котором в качестве носителя информации предполагается в том числе использование хаотических радиоимпульсов [2].

В БСС медицинского назначения можно условно выделить две зоны: крупномасштабную (магистральную), обеспечивающую доставку информации по всему медицинскому учреждению, и локальную – зону беспроводных нательных сетей (БНС) (называемых также беспроводными нательными сенсорными сетями – БНСС), которые располагаются на теле и/или в окрестности тела человека и предназначены для непосредственного наблюдения за его физиологическими параметрами.

В общем случае беспроводные нательные сенсорные сети представляют собой систему разнородных устройств, расположенных в непосредственной окрестности или внутри тела пользователя и взаимодействующих между собой и с центральным координирующим узлом посредством беспроводной связи для получения полезного эффекта для потребителя.

Устройства в нательной сети можно разделить на сенсорные узлы, актуаторные узлы и персональные устройства.

Беспроводный сенсорный узел – устройство, которое реагирует на определенный физический (химический) процесс, собирает данные, при необходимости обрабатывает их и передает беспроводным образом. Сенсорный узел состоит из нескольких компонентов: собственно датчика, блока питания, процессора, памяти, передатчика или приемопередатчика.

Беспроводный актуаторный узел – устройство, которое активно воздействует на тело в соответствии с данными, получаемыми от сенсоров или через взаимодействие с пользователем. Компоненты актуаторного узла сходны с компонентами сенсорного узла. Он содержит собственно актуатор (т. е. прибор для медицинского применения, включающий емкость для хранения медицинского препарата), блок питания, процессор, память, передатчик или приемопередатчик.

Беспроводное персональное устройство – устройство, которое собирает всю информацию, полученную от датчиков и исполнительных механизмов (актуаторов), и информирует пользователя (т. е. пациента, медсестру, врача и т. д.) при помощи внешнего шлюза, привода или дисплея светодиодов на приборе. Компоненты ПУ: блок питания, (большой) процессор, память и приемопередатчик. Это устройство называют также блоком контроля тела (Body Control Unit – BCU) [3], шлюзом тела или стоком. В некоторых реализациях в качестве ПУ используется смартфон.

Сети внутри тела применяют для мониторинга и включают программы изменений для пейсмейкеров и имплантируемых сердечных дефибрилляторов, контроля

функций мочевого пузыря и реабилитации движения конечностей [4]. На теле человека используют мониторинг ЭКГ, давления крови, температуры и дыхания. При использовании БНС пациенты обладают значительной физической мобильностью и в меньшей степени привязаны к больнице.

ХАОТИЧЕСКАЯ СШП РАДИОСВЯЗЬ ДЛЯ НАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Разработка и принятие стандарта IEEE 802.15.6 для физического уровня персональных бытовых и медицинских сенсорных сетей была призвана решить следующие проблемы, свойственные узкополосным сигналам:

- 1) увеличить пропускную способность WBAN до 1–10 Мбит/с;
- 2) обеспечить электромагнитную совместимость БСС с электронной аппаратурой специальных отделений клиник;
- 3) повысить надежность связи по сравнению с узкополосными сетями;
- 4) упростить структуру сети и алгоритмы ее работы;
- 5) уменьшить энергопотребление компонентов сети.

В работе [5] на основе анализа характеристик отдельного сенсорного узла показано, что подходящими кандидатами для использования в беспроводных сетях медицинского назначения являются СШП прямохаотические приемопередатчики. В данной работе делаются оценки потенциальных характеристик БСС в целом.

Пропускная способность сети. Физическая скорость прямохаотических приемопередатчиков, описанных в [5], составляет 3–6 Мбит/с. Из анализа пропускной способности беспроводных сенсорных сетей [6] известно, что предельно возможная пропускная способность сети в целом в 5–6 раз ниже скорости передачи между ее узлами в режиме «точка-точка». Таким образом, пропускная способность сетей из прямохаотических приемопередатчиков может достигать величин ~1 Мбит/с, в то время как в сетях, использующих узкополосные сигналы (на основе технологии ZigBee), эта величина составляет не более 40 Кбит/с. Недостаточная пропускная способность может быть причиной неустойчивой работы сети, как это наблюдалось, например, в [7].

Электромагнитная совместимость. Средняя излучаемая мощность P прямохаотического приемопередатчика ППС-43 [5], например, при скорости передачи $R \sim 64$ Кбит/с не превышает $P = -13$ дБм, что примерно в 10 раз меньше, чем у сетей, использующих узкополосную технологию ZigBee. Кроме того, излучаемая мощность распределена по полосе $\Delta F = 2$ ГГц, в то время как ZigBee работает в полосе $\Delta F = \sim 5$ МГц. Таким образом, спектральная плотность излучаемого сигнала в случае СШП устройств составляет менее 10^{-3} от спектральной плотности излучения узкополосных систем. Эти уровни излучения не превосходят рекомендуемого стандартом IEEE802.15.6 уровня излучения узлов БСС, с точки зрения влияния этого излучения на надежность работы электронной медицинской аппаратуры.

Повышение надежности связи. В радиосистемах малого радиуса действия, к которым относятся приемопередатчики рассматриваемых беспроводных сенсорных сетей, обычно в качестве допустимого уровня ошибки принимается вероятность ошибки на бит не более $P = 10^{-3}$. Во многих случаях, не связанных с медицинскими приложениями, такая вероятность ошибки является приемлемой. В других случаях, когда требуется более низкий уровень, можно использовать достаточно простые коды, исправляющие ошибки, чтобы уменьшить уровень ошибки на 1–3 порядка. Вместе с тем применение помехоустойчивого кодирования повышает энергопотребление приемо-

передатчиков, а также дополнительно понижает скорость передачи R в 1,5–2 раза, что не всегда допустимо.

В экспериментах с прямохаотическими приемопередатчиками в режиме «точка-точка» было установлено, что вероятности ошибок на бит $P = 10^{-6} - 10^{-7}$ являются типичными в условиях офиса и производственных помещений даже без специального помехоустойчивого кодирования. При ретрансляциях вероятность ошибок возрастает, но даже при $N_R = 4-5$ ретрансляциях их уровень, как правило, не превышает $P = 10^{-5}$. Поэтому можно ожидать, что при пакетной передаче медицинских данных при длине пакетов менее $L = 1$ Кбит будет теряться не более 1 % пакетов.

Упрощение структуры сети и алгоритмов ее работы. Если потоки информации в сети значительно меньше ее пропускной способности, возможно использование режимов с независимым сбором и передачей данных от каждого сенсорного устройства. Несмотря на отсутствие координации между узлами столкновения между пакетами, передаваемыми по сети, маловероятны. Такой режим работы резко упрощает алгоритмы работы сети по сравнению с синхронной работой узлов сети и, при прочих равных условиях, увеличивает ее надежность. В рассматриваемых СШП сетях такой сценарий работы может быть реализован во многих приложениях.

Уменьшение энергопотребления. Анализ показал, что при одинаковой средней скорости передачи энергопотребление СШП устройств в 3–5 раз меньше, чем у узкополосных систем на основе технологии ZigBee [8]. Данные для некоторых характерных скоростей для конечных устройств и ретрансляторов приведены в таблице. Для конечных устройств с датчиками автономное время работы при трафике, например, $R = 100$ Кбит/с составляет 10–12 суток, что вполне комфортно как для пациентов, так и для персонала.

Энергопотребление приемопередатчика в режиме ретрансляции/передачи данных

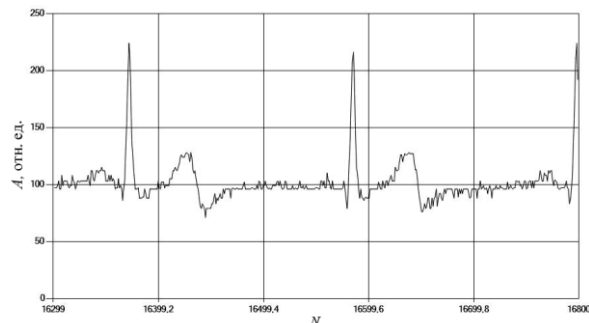
Скорость передачи данных, Кбит/с	Потребляемый ток, мА	Время автономной работы с источником питания 1000 мАч, сут.
1	0,09/0,077	более 400/500
10	0,66/0,5	62/83
100	5,0/3,0	8/14

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СШП СЕТЬ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В медицинских учреждениях приходится сталкиваться с датчиками, являющимися требовательными к пропускной способности сети, например датчики для снятия электрокардиограмм. Одновременное использование многих датчиков такого типа будет приводить к большой загрузке сети. При этом высокие требования предъявляются и к надежности передачи данных, которая должна обеспечивать качественное восстановление кривых электрокардиограмм в точке приема.

Создана экспериментальная аппаратура, позволяющая реализовать фрагменты сети медицинского назначения, и проведена серия экспериментов с ней. Использована сенсорная плата, в составе которой имеются аналоговые датчики температуры, влажности и освещенности, цифровой акселерометр, а также пульсометр, который позволяет измерять пульс пациента и оценивать вид пульсовой волны. На выходе пульсо-

метра формируется аналоговый сигнал в диапазоне напряжений $V = 0 \dots 3,3$ В, который затем поступает на АЦП микроконтроллера приемопередатчика. Частота съема данных на АЦП составляет $f_s = 200$ отсчетов в секунду, каждый отсчет занимает $L = 2$ байта данных. Скорость передачи данных от пульсометра составляла $R = 3200$ бит/с. Данные от пульсометра по беспроводной СШП сети передавались в ПК, где в режиме реального времени в ней строился график пульсовой волны (рисунок).



Пульсовая волна

В результате экспериментов было установлено, что данные от пульсометра передавались корректно на требуемой скорости. Потери информации не превышали 1 %. Оценки показывают, что в случае работы сети в синхронном режиме возможно подключение около 250 каналов передачи ЭКГ. Это более чем на порядок превышает возможности узкополосных сенсорных систем на основе ZigBee.

Полученные результаты показывают, что сенсорные сети на основе СШП хаотических радиоимпульсов могут быть эффективно использованы для решения задач автоматизации мониторинга пациентов в медицинских учреждениях, в том числе передачи больших объемов данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Yang G.-Z. Body Sensor Networks. London : Springer, 2006.
2. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.6: Wireless Body Area Networks. N.Y. : IEEE, 2012.
3. Body Area Network BAN – a key infrastructure element for patient-centered medical applications / R. Schmidt [et al.] // Biomedical Engineering. 2002. Vol. 47, № 1. P. 365–368.
4. System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring / C. Otto [et al.] // J. Mobile Multimedia. 2006. Vol. 1, № 4. P. 307–326.
5. Сверхширокополосные беспроводные нательные сенсорные сети / А. С. Дмитриев [и др.] // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 12. С. 1160–1170.
6. Ashton S. Zigbee Network Performance. Typical Results and Implications for Application Design // 2nd Annual ZigBee Developers' Conf. Proc. Rosemont, 2006.
7. López G., Custodio V., Moreno J. I. LOBIN: E-Textile and Wireless-Sensor-Network-Based Platform for Healthcare Monitoring in Future Hospital Environments // IEEE Trans. Inform. Technol. in Biomed. 2010. Vol. 14, № 6. P. 1446–1458.
8. Ефремова Е. В., Лазарев В. А. Анализ энергопотребления приемопередатчиков для сверхширокополосных беспроводных сенсорных сетей // Успехи соврем. радиоэлектроники. 2013. № 3. С. 43–54.