

На правах рукописи



Рыжов Антон Игоревич

Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети  
медицинского назначения на основе хаотических  
радиоимпульсов

Специальность 01.04.03 – «Радиофизика»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН).

**Научный руководитель:** **Дмитриев Александр Сергеевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор

**Официальные оппоненты:** **Старков Сергей Олегович;**  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры «Компьютерные системы, сети  
и технологии» Обнинского института атомной  
энергетики – филиала национального  
исследовательского ядерного университета МИФИ

**Клиньшов Владимир Викторович;**  
кандидат физико-математических наук, старший  
научный сотрудник отдела нелинейной динамики  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института прикладной физики  
РАН

**Ведущая организация:** **Московский государственный университет  
информационных технологий, радиотехники и  
электроники (г. Москва)**

Защита состоится 2 октября 2015 г., в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations.html>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» августа 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Потапов  
Александр  
Алексеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Бурное развитие беспроводных инфокоммуникационных технологий ставит новые, порой нетрадиционные, вопросы перед современной радиофизикой, включающие создание, исследование и использование новых типов сигналов и методов их обработки, разработку и развитие радиосистем малого радиуса действия, исследования в области многоэлементных беспроводных сетей, в том числе беспроводных сенсорных сетей (БСС).

В данной диссертационной работе затрагиваются перечисленные вопросы, но основное внимание уделяется БСС, использующим в качестве носителя информации сверхширокополосные (СШП) хаотические радиоимпульсы. В процессе исследований определяются требования к радиосистемам малого радиуса действия, составляющим аппаратную основу разрабатываемых и исследуемых в работе БСС медицинского назначения.

БСС имеют весьма большой спектр применения: экологический мониторинг естественной среды обитания, мониторинг зданий и сооружений, контроль уровня загрязнения окружающей среды, контроль производства различной продукции, отслеживание целей в военной области и другие. Для упорядочивания их применения разработано несколько международных стандартов [1-3].

Одной из перспективных сфер применения технологии БСС является медицина.

В современной медицине остро стоит проблема организации процесса наблюдения за показателями физического состояния организма (электрокардиограмма (ЭКГ), давление крови, пульс, дыхание, температура) пациентов, находящихся на стационарном лечении в больницах и клиниках при минимальном участии медицинского персонала. Ее решение позволит значительно улучшить ситуацию как с диагностикой заболеваний, так и с мониторингом состояния больных в процессе лечения. Об актуальности разработки и внедрения автоматизированных систем мониторинга свидетельствуют следующие цифры. По данным работ [4,5] от 4 до 17% смертельных случаев в больницах США вызваны остановкой сердца.

Исследование подобных случаев показало, что около 70% из них могли бы быть предотвращены при заблаговременном обнаружении ухудшения состояния пациентов. Выявление таких ситуаций возможно при помощи анализа данных, полученных при систематическом наблюдении за основными показателями состояния организма. Подобный непрерывный мониторинг этих параметров в настоящее время осуществляется лишь в реанимационных отделениях.

Проблема может быть решена при помощи БСС, которые позволят обеспечить мониторинг основных показателей состояния организма с необходимой частотой снятия данных [6]. В связи с этим в ряде стран интенсивно ведутся работы по созданию БСС медицинского назначения и изучению различных аспектов их применения. Несмотря на достаточно короткий период активности, в этом направлении уже получены принципиальные результаты, в том числе и клинических испытаний, в целом подтверждающие первоначальные ожидания относительно применения БСС в медицинской практике.

Вместе с тем проведенные исследования вскрыли ряд проблем, которые необходимо решить для успешного широкого внедрения этой новой технологии в медицинскую практику. Одной из таких проблем, ограничивающих эффективность медицинских БСС на основе стандартных узкополосных средств беспроводной связи, оказывается пропускная способность коммуникационной сети. Выяснилось, что при работе с небольшими потоками данных и с малым числом узлов в сети, сети работают устойчиво. Когда же проводились эксперименты с более высокими потоками данных и при большем количестве узлов, сети переставали работать стабильно.

Другие проблемы, связанные с использованием БСС на основе узкополосных сигналов в системах автоматизированного мониторинга состояния пациентов касаются электромагнитной совместимости с электронной медицинской аппаратурой, обеспечения надёжной передачи данных, экологической безопасности, конфиденциальности собираемых и передаваемых данных.

Решить эти проблемы призваны СИП 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 использование хаотических радиоимпульсов [3].

В данной работе рассматривается задача создания БСС медицинского назначения на основе прямохаотических СШП приёмопередатчиков, использующих в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы.

Следует отметить, что технология беспроводной связи, использующей в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы (прямохаотическая передача информации), была предложена в России, в ИРЭ РАН в 2000 году и успешно развивается в самом ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и в смежных организациях [7-11]. Результаты этих предшествующих исследований оказали важное влияние при формулировании темы диссертации и ее конкретных задач.

В работе проведен анализ состояния проблемы создания БСС медицинского назначения, изучаются вопросы распространения СШП хаотических радиоимпульсов в условиях среды, характерной для медицинских учреждений, разрабатываются и исследуются компоненты и сегменты экспериментальной СШП БСС на основе хаотических радиоимпульсов. Показывается, что разработанные аппаратные и программные средства могут быть использованы не только в медицинских целях, но при решении смежных задач, в частности, для исследования процессов обмена информации в многоэлементных биологических системах.

**Актуальность работы** определяется существенным интересом к БСС, возможностью качественного улучшения диагностики заболеваний за счёт применения таких систем беспроводного сенсорного мониторинга, поиском новых областей применения технологии СШП хаотических радиоимпульсов, соответствием технологии СШП хаотических радиоимпульсов международным стандартам беспроводных локальных сетей связи IEEE 802.15.4a и 802.15.6.

**Цель работы** состоит в создании и исследовании экспериментальной БСС медицинского назначения на основе СШП хаотических радиоимпульсов, включая анализ вопросов распространения хаотических радиоимпульсов в условиях медицинских учреждений, разработку аппаратных и программных средств для

сети, изучение поведения БСС в средах, характерных для медицинских учреждений, и оценку ее ключевых характеристик.

### **Основные задачи, решаемые в работе**

- исследование распространения хаотических радиоимпульсов в условиях характерных для медицинских учреждений;
- разработка аппаратных и программных средств для СШП БСС медицинского назначения, использующей в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы;
- изучение поведения экспериментальной СШП БСС в различных условиях и режимах функционирования;
- исследование возможности применения СШП БСС для эмулирования передачи информации и потока спайков в нейронных сетях.

### **Научная новизна** результатов заключается в том, что:

- впервые исследовано распространение СШП хаотических радиоимпульсов через стены зданий, щели в металлических поверхностях и вблизи поверхности тела человека, в которых получены оценки затухания СШП сигналов в этих средах;
- разработаны, изготовлены и исследованы аппаратные и программные средства для реализации экспериментальной СШП БСС медицинского назначения;
- создана и исследована экспериментальная СШП прямохаотическая сенсорная сеть для медицинских учреждений;
- на основе анализа полученных результатов сформулированы требования и даны рекомендации для создания узлов СШП БСС будущего поколения, которые в полной мере отвечают требованиям к таким системам по гибкости применяемых датчиков, возможности сопряжения с другими средствами беспроводной связи, требованиям по энергопотреблению и энергопитанию, соответствуя при этом базовым требованиям стандартом IEEE 802.15.6;
- показана возможность применения СШП БСС для эмулирования передачи информации и потока спайков в нейронных сетях.

**Достоверность диссертационной работы** подтверждается соответствием расчетов и оценок, полученных и используемых автором, теоретическим положениям известным из литературы, соответствием результатов экспериментальных исследований теоретическим оценкам, техническими характеристиками разработанных аппаратных и программных решений.

#### **Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

- структура и алгоритмы работы СШП БСС с использованием в качестве носителя информации хаотических радиоимпульсов, предназначенной для сбора и передачи информации в медицинских учреждениях;
- экспериментальный макет СШП БСС медицинского назначения, результаты исследования которого доказывают практическую реализуемость создания сетей, соответствующих требованиям стандарта IEEE 802.15.6;
- анализ характера распространения СШП хаотических сигналов при их прохождении в среде распространения, характерной для медицинского учреждения (стены, щели в металлических поверхности, область вблизи поверхности тела человека);
- использование аппаратуры и алгоритмов, созданных для экспериментальной СШП БСС, при решении смежных задач (на примере моделирования передачи битовой информации между нейроподобными элементами и эмулирование потока спайков между нейронами).

#### **Научно-практическое значение**

Результаты диссертации используются при разработке СШП прямохаотических приемопередающих устройств и при создании СШП БСС на хаотических радиоимпульсах со временем автономной работы до нескольких лет.

#### **Апробация работы**

Основные результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на следующих международных и российских научных конференциях: «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (МФТИ, Москва, Россия, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012), 17 конференции по нелинейной динамике электронных систем «NDES 2009» (Рапперсвилль,

Швейцария, 2009), 26-ом международном симпозиуме «Достижения в электромагнитных исследованиях PIERS'2009» (Москва, Россия, 2009), XV и XVI-ой научных школах «Нелинейные волны» (Н. Новгород, Россия, 2010, 2012), Конкурсах работ молодых учёных и аспирантов им. И. В. Анисимкина 2010, 2011 годах (ИРЭ РАН, Москва, Россия), I и III Всероссийских Армандовских чтениях, (Муром, Россия, 2011, 2012, 2013), Докладах 5, 6, 8 Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, Россия, 2011, 2012, 2014), Информационные системы и технологии 2012 (Москва, Россия, 2012), Международной школе ХАОС–2013 (Саратов, Россия, 2013).

По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 8 статей в изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 11 работ в трудах научных конференций.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора заключается в участии в постановке научных задач, определении методов и подходов к их решению, проведении части расчётов и компьютерного моделирования, участии в создании экспериментального макета СШП сети и разработке для него программно-алгоритмического обеспечения, подготовке и проведении экспериментов. Все вошедшие в диссертацию результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

**Структура и объём работы:** диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Содержит 134 страницы, 43 рисунка, 9 таблиц. Список цитированной литературы содержит 66 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту и краткое содержание работы.

В **Первой главе** представлен обзор и анализ работ по созданию и испытаниям экспериментальных БСС медицинского назначения за последние годы.



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.

Проведенный анализ данных, представленных в литературе, а также теоретические оценки, показывают, что факторами, ограничивающими эффективность БСС медицинского назначения при применении в ней традиционных узкополосных каналов связи, могут стать: пропускная способность сети, электромагнитная совместимость с электронной медицинской аппаратурой, надёжность передачи данных, экологическая безопасность, конфиденциальность собираемых и передаваемых данных. Эти потенциальные проблемы относятся как к магистральной, так и к нательной зонам применения БСС.

Для преодоления ограничений, связанных с узкополосными средствами связи в БСС медицинского назначения, был подготовлен и введен стандарт IEEE 802.15.6 (2012 год), в котором важная роль отводится беспроводным СШП средствам связи на основе хаотических радиоимпульсов. В главе рассматриваются основные положения этого стандарта, его общие черты и различия с существующими стандартами беспроводной персональной связи.

На основе проведённого анализа формулируются требования к перспективным СШП БСС медицинского назначения.

С точки зрения, развиваемой в работе, перспективные БСС медицинского назначения должны решать задачу как локального сбора информации (т.е. решать задачи БНС), так и обеспечивать магистральную доставку этой информации по медицинскому учреждению в целом. Именно в такой постановке и с такими требованиями рассматриваются вопросы построения БСС и их исследования.

Одна из проблем, которая должна быть исследована при таком подходе, связана с условиями распространения СШП хаотических радиоимпульсов в среде медицинского учреждения.

Исследованию этих вопросов посвящена **Вторая глава** диссертации.

Перспективные БСС будут работать в реальной среде медицинских учреждений, распространение СШП сигналов через которую можно разделить на три основные компоненты: распространение в помещениях и между помещениями; распространение, связанное с телом человека; распространение, связанное с металлическими предметами, находящимися вблизи приёмопередатчиков.

В начале главы рассматриваются и анализируются данные из литературы, относящиеся к распространению радиоволн микроволнового диапазона в условиях помещений. Прежде всего, речь идет об узкополосных сигналах и прохождении микроволнового излучения через стены зданий.

Приводятся данные по ослаблению узкополосных сигналов в строительных материалах (в основном, это кирпич и бетон) на основе ряда работ по этой тематике. При этом отмечается сильное влияние влажности материалов на ослабление радиоволн.

Были проведены эксперименты по определению величины затухания СШП хаотического сигнала с полосой частот около 2 ГГц при его прохождении через стены зданий. В экспериментах в качестве источников и приемников СШП сигналов использовались разработанные в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН прямохаотические СШП приёмопередатчики ППС-43 диапазона 3-5 ГГц.

Ослабление сигнала в стене оценивалось по формуле

$$Q = \frac{(V_{\text{out\_FS}} - V_{\text{out\_W}})}{S} \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где  $Q$  – ослабление сигнала в стене,  $V_{\text{out\_W}}$  и  $V_{\text{out\_FS}}$  – напряжение на выходе логарифмического детектора приемника при наличии стены в канале передачи и в свободном пространстве соответственно,  $S$  – чувствительность логарифмического детектора. На рис. 1 представлен сводный график полученных результатов

ослабления сигнала.

На основании данных измерений и теоретических оценок делается вывод о том, что ослабление СШП сигнала диапазона 3–5 ГГц в кирпичной стене составляет ~ 5–7 дБ в стене толщиной 34 см и ~ 6–10 дБ в стене толщиной 64 см.

Кроме того, показано, что ослабление СШП сигнала в полосе 3–5 ГГц ниже, чем ослабление узкополосного сигнала на тех же частотах на 2 – 5 дБ.

Установлено, что в целом при оценке потерь СШП сигнала в полосе частот 3 – 5 ГГц в типовой стене (толщина 30 см) можно ориентироваться на затухание, не превышающее 10 дБ.

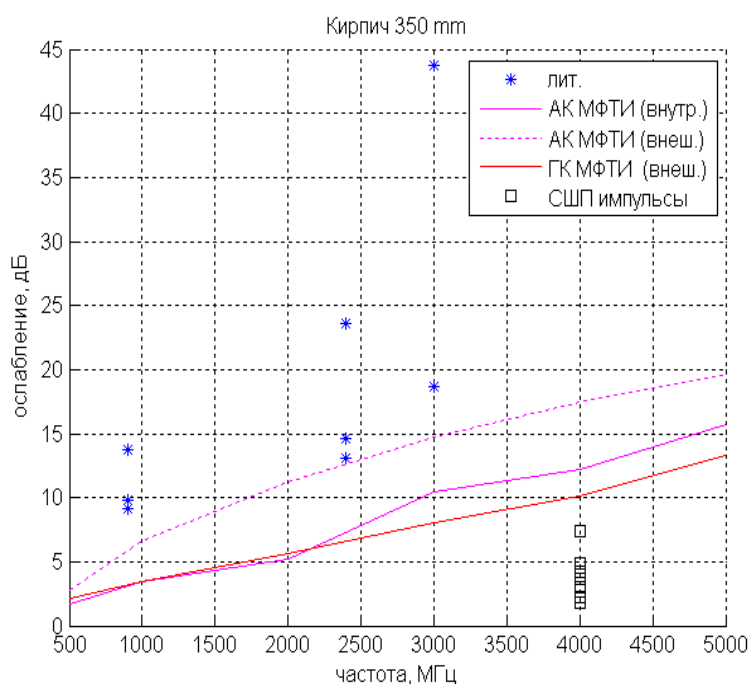


Рис. 1. Сводный график ослабления сигнала в кирпичной стене толщиной 35 см.

*Прохождение через щели в металлических объектах.* Рассмотрена задача «просачивания» СШП хаотических радиоимпульсов через щели в металлических объектах, актуальная при применении СШП-сигналов в сложных условиях распространения. Задача моделирует распространение СШП сигналов в прикроватной области, где может находиться значительное количество металлических предметов и поверхностей.

Описаны эксперименты по определению затухания СШП хаотического сигнала при прохождении его через щели различных размеров относительно

длины волны излучения.

Установлено, что интегральное ослабление СШП-сигнала при «просачивании» незначительно зависит от длины щели в случае, если эта длина существенно превышает среднюю длину волны излучаемого сигнала.

На рис. 2 представлена зависимость ослабления сигнала от продольного размера щели в фольге.

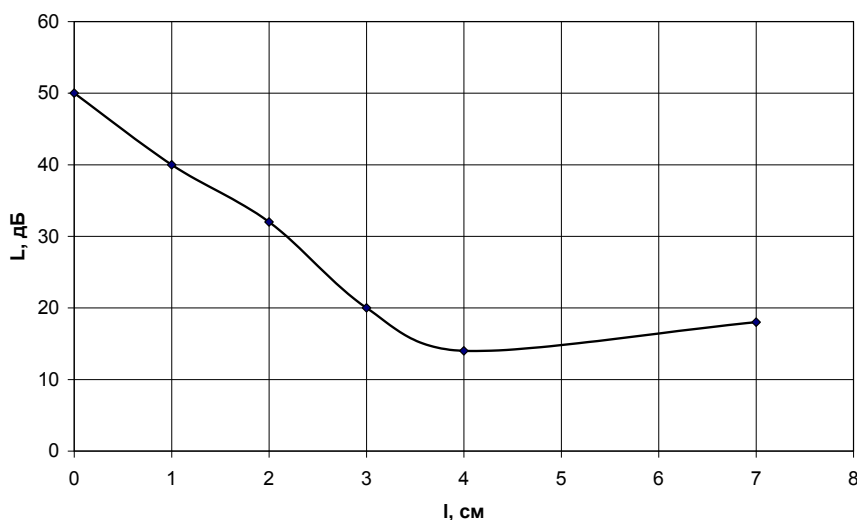


Рис. 2. Зависимость ослабления сигнала от продольного размера щели в фольге.

Наименьшее ослабление сигнала (на  $\sim 10 \dots 15$  дБ при ширине щели 1 мм) наблюдается при «просачивании» электромагнитного излучения через щели, характерные размеры которых составляют  $\sim \lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны, соответствующая средней частоте СШП-сигнала. В случаях как уменьшения длины щели, так и её увеличения относительно резонансных размеров значительно увеличивается затухание сигнала (на  $\sim 10 \dots 20$  дБ при той же ширине щели). При уменьшении ширины щели затухание изменяется примерно обратно пропорционально её поперечному размеру.

#### *Распространение СШП сигнала вблизи поверхности тела человека.*

Исследование распространения СШП хаотических радиоимпульсов вблизи тела человека производилось экспериментально. Предварительно была разработана методика оценки затухания СШП хаотического сигнала при его распространении вблизи поверхности тела человека для трёх случаев

расположения приёмопередатчиков:

- вдоль поверхности тела человека (модель канала СМЗ, приёмник и передатчик расположены на поверхности тела человека),
- вокруг грудной клетки (модель канала СМ3),
- передатчик находился у поверхности тела, а приёмник располагался на некотором расстоянии от него в зоне прямой видимости (модель канала СМ4, передатчик находится на поверхности тела человека, а приёмник находится в отдалении от него в зоне прямой видимости).

В качестве приемника и передатчика на СШП хаотических радиоимпульсах использовались приёмопередатчики ППС-43.

Затухание сигнала на расстоянии  $d$  между приёмником и передатчиком в среде может быть представлено в виде:

$$PL(d) = PL_0 + 10 \cdot \gamma \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2)$$

Здесь  $PL_0$  – это затухание сигнала на заданном расстоянии  $d_0$  а  $\gamma$  – показатель затухания. При помощи графика зависимости  $PL(d)$ , полученного экспериментально, можно определить  $PL_0$  и  $\gamma$ , что является основной задачей экспериментов. На рис. 3 представлена зависимость затухания сигнала от расстояния между приёмником и передатчиком для случая расположения приёмопередатчиков вдоль поверхности тела человека.

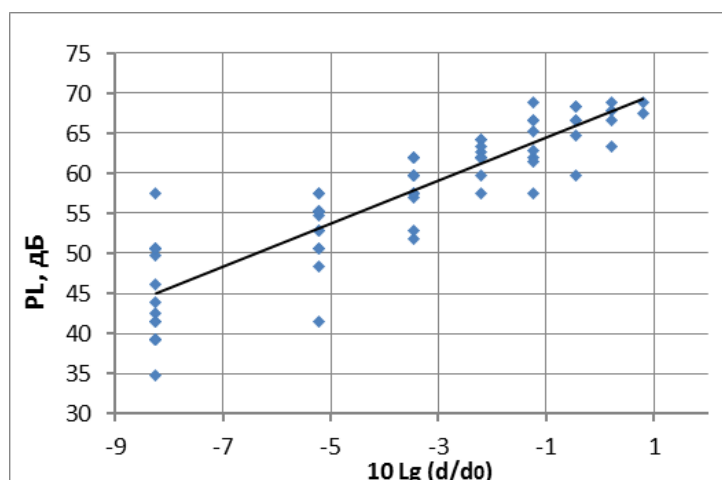


Рис. 3. Зависимость затухания сигнала от расстояния между приёмником и передатчиком для случая расположения приёмопередатчиков вдоль поверхности тела,  $d_0 = 1$  м.

Получены следующие результаты: затухание сигнала на 1 м  $PL_0 = 67,2$  дБ и показатель затухания  $\gamma = 2,7$  для модели канала связи СМ3 при наличии прямой видимости между приёмником и передатчиком (соответствует максимальному расстоянию 1,2 м между устройствами);  $PL_0 = 80,5$  дБ и показатель затухания  $\gamma = 3,5$  для модели канала связи СМ3 при отсутствии прямой видимости между приёмником и передатчиком (соответствует максимальному расстоянию 0,4 м между устройствами);  $PL_0 = 49,3$  дБ и показатель затухания  $\gamma = 1,5$  для модели канала связи СМ4 при наличии прямой видимости между приёмником и передатчиком (соответствует максимальному расстоянию 23 м между устройствами).

Показано, что с точки зрения распространения сигнала СШП хаотические радиоимпульсы диапазона 3 - 5 ГГц в типичных условиях медицинского учреждения демонстрируют умеренное затухание и могут быть использованы для создания БСС. Полученные количественные данные о затухании целесообразно использовать при формулировании технических требований к характеристикам передатчиков и приемников для узлов перспективных СШП БСС медицинского назначения.

В **Третьей главе** рассматривается задача создания БСС на основе СШП хаотических приёмопередатчиков для сбора медицинских показателей пациентов. Дается теоретическая оценка основных характеристик экспериментальной СШП сенсорной сети на основе прямохаотических приёмопередатчиков ППС – 43, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики приёмопередатчиков ППС-43

Физическая скорость передачи	Рабочая частота	Потребляемый ток	Чувствительность	Излучаемая мощность
До 6 Мбит/с	3-5 ГГц	3,5 мА ~ 64 кбит/с	-79 дБм ~ 64 кбит/с	-16 дБм ~ 64 кбит/с
		8,9 мА ~ 256 кбит/с	-73 дБм ~ 256 кбит/с	-10 дБм ~ 256 кбит/с
		30,3 мА ~ 1 Мбит/с	-67 дБм ~ 1 Мбит/с	-4 дБм ~ 1 Мбит/с

Для обоснования практической реализуемости СШП БСС медицинского назначения и их ожидаемых характеристик на основе учебно-научно-исследовательского комплекса «Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети» («УНИК») была создана экспериментальная аппаратура, позволяющая реализовать различные конфигурации сети медицинского назначения, и проведена серия экспериментов с ней.

В главе приведено описание основных компонентов СШП БСС, её структуры и алгоритмов сбора и передачи данных.

Представлены результаты экспериментальных исследований для следующих типичных ситуаций передачи информации по сети (здесь в качестве сенсорного узла использовался узел с датчиком температуры).

*Передача данных из нескольких помещений* (соответствует топологии сети «дерево»).

В экспериментах изучалась работа сети при приёме данных от сенсорных узлов, расположенных в двух помещениях, базовая станция находилась вне прямой видимости сенсорных узлов, которые осуществляли сбор данных. Топология сети имела вид «дерева» с двумя ветвями. При проведении испытания использовались 2 сенсорных узла (источником данных в экспериментах являлись датчики температуры), 3 ретранслятора 1 базовая станция.

В экспериментах с СШП БСС в топологии типа «дерево» при независимом снятии данных от сенсорных узлов не наблюдались коллизии из-за столкновения пакетов.

*Передача данных от ансамбля сенсорных узлов.*

В экспериментах изучалась возможность работы БСС в случае одновременного сбора информации от нескольких сенсорных узлов, данные от которых поступали на базовую станцию через ретранслятор. Топология сети представляла собой комбинацию топологий «звезды» и «цепочки».

При проведении экспериментов использовались 10 сенсорных узлов, узел ретранслятор и базовая станция. Все сенсорные узлы сети работали в асинхронном режиме, посылая данные один раз в секунду.

Эксперименты показали, что в такой топологии сети система также устойчиво работает в асинхронном режиме. При этом теоретические оценки показывают, что устойчивый характер функционирования сети сохранится при увеличении числа сенсорных узлов по меньшей мере в десять раз по сравнению с числом узлов, использовавшихся в экспериментах.

*Передача данных от движущегося сенсорного узла* (соответствует топологии сети «цепочка»).

Задачей экспериментов являлось исследование работы СШП БСС в случае передачи данных от сенсорного узла, перемещающегося вдоль цепочки ретрансляторов. Данные от узла принимает ближайший к нему ретранслятор. Эксперименты соответствуют ситуации, когда по коридору медицинского учреждения перемещается пациент с датчиком. В отличие от предыдущих испытаний, топология сети динамически изменялась в зависимости от положения сенсорного узла.

При проведении экспериментов использовался сенсорный узел, три приёмопередатчика-ретранслятора и базовая станция.

Данные от подвижного сенсорного узла поступали на тот ретранслятор, в области которого находился в данный момент сенсорный узел, после чего передавались на следующий в цепочке ретранслятор, находящийся ближе к базовой станции и т.д. После серии ретрансляций данные поступали на базовую станцию.

Во время проведения экспериментов было установлено, что данные от сенсорного узла непрерывно поступают на базовую станцию и отображаются на экране компьютера, в том числе во время передвижения по коридору.

Кроме этого, был проведён эксперимент по передаче данных от специально разработанного пульсометра для оценки работы сети с высокими потоками данных (рис. 4, скорость передачи данных от пульсометра составляла 3200 Бит/с). На рис. 5 приведен график пульсовой волны, полученной при передаче данных от пульсометра. Оценки показывают, что в случае работы сети в синхронном режиме возможно подключение около 250 каналов с передачей ЭКГ. Это более чем на



порядок превышает возможности узкополосных сенсорных систем на основе технологии ZigBee.

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

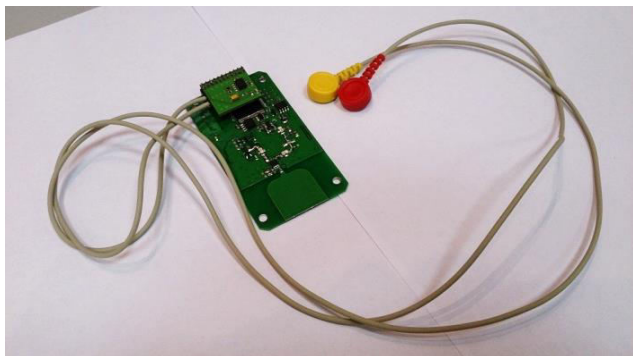


Рис. 4. Внешний вид пульсометра, подключённого к плате Приёмопередатчика.

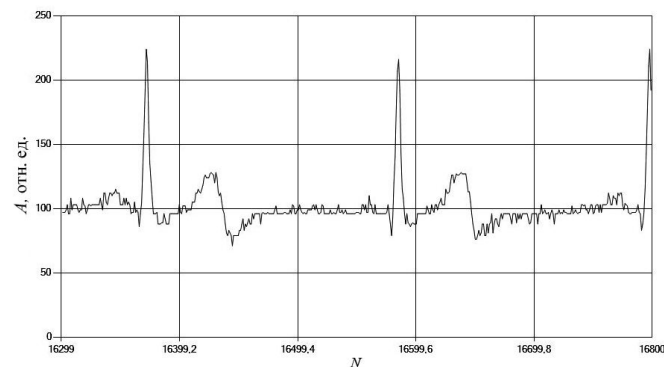


Рис. 5. Пульсовая волна;  $N$  – число отсчетов,  $A$  – значение отсчета.

В процессе создания экспериментальной БСС медицинского назначения были разработаны аппаратные и программные средства, возможности которых выходят за рамки чисто медицинских систем. Это демонстрируется в **Четвертой главе** на примере задачи передачи информации между нейроподобными элементами.

Задача решается в два этапа: на первом осуществляется моделирование системы передачи информации на компьютере и оценка её характеристик, а на втором проводится экспериментальное исследование, где в качестве нейроподобных элементов используются СШП узлы сети. В этом случае вместо сенсоров на узлах устанавливаются специальные платы актуаторы, включающие в себя микроконтроллеры. На этих микроконтроллерах в виде программ реализуются математические модели нейрона-передатчика и нейрона-приемника. Сигнал с выхода нейрона-передатчика в цифровой форме передается от одного узла к другому, где принимается, обрабатывается и вводится в виде внешнего сигнала в модель нейрона-приемника

В качестве модели нейрона в работе используется модель Ходжкина – Хаксли, обладающая основными свойствами нейрона с точки зрения реакции на внешние сигналы и генерации спайков. Модель описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 C_m \dot{V} &= I_{\text{ион}}(V, m, h, n), \\
 \dot{m} &= \alpha_m(V)(1 - m) - \beta_m(V)m, \\
 \dot{h} &= \alpha_h(V)(1 - h) - \beta_h(V)h, \\
 \dot{n} &= \alpha_n(V)(1 - n) - \beta_n(V)n.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Здесь  $C_m$  – ёмкость мембраны,  $V$  – потенциал мембраны,  $I_{\text{ион}}$  – ионный ток через мембрану,  $m$ ,  $h$  и  $n$  – безразмерные величины, характеризующие проводимость мембраны,  $\alpha_m, \beta_m, \alpha_n, \beta_n, \alpha_h, \beta_h$  – коэффициенты, определяющие динамику движения ионов.

Исследован вопрос об эффективности спайковой структуры передачи сигналов между нейронами с точки зрения стандартных критериев передачи цифровой информации между передатчиком и приемником. С этой целью предложена структура системы передачи, состоящая из формирователя потока прямоугольных импульсов, нейрона-передатчика, нейрона-приёмника и детектирующего устройства. Выявлены ограничения на передаваемый информационный сигнал (наличие периода рефрактерности, ограничения на значения амплитуды и ширины импульсного сигнала, на который нейрон будет откликаться спайками). Показано, что такая система способна передавать двоичную информацию и обладает определённой помехоустойчивостью (модель нейрона-приёмника распознаёт передаваемую информацию с вероятностью ошибки на бит  $10^{-3}$  при отношении уровня сигнала к шуму около 13 дБ). При использованных значениях параметров скорость передачи составляет около 100 бит/с. Это значение может рассматриваться как грубая оценка скорости передачи информации в живых нейронных системах.

Проведены эксперименты по передаче через радиоканал между двумя узлами сети аналогового сигнала со спайковой структурой для двух характерных случаев функционирования модели нейрона Ходжкина – Хаксли:

- передача нейронных сигналов (спайков) в нормальном режиме (входная последовательность прямоугольных импульсов подаётся с периодом, превышающем период рефрактерности нейрона),
- передача нейронных сигналов (спайков) в режиме, когда входная последовательность прямоугольных импульсов подаётся с периодом, меньшим чем период рефрактерности нейрона.

На рис. 6 представлена временная реализация сигнала, переданного между двумя узлами СШП сети для первого случая.

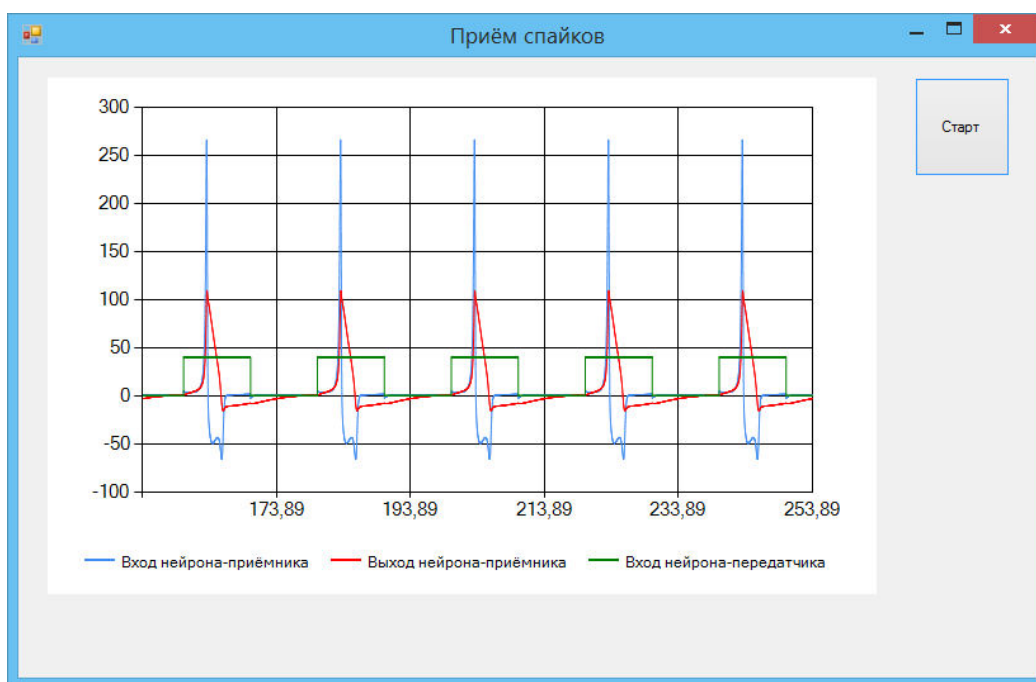


Рис. 7. Результаты эксперимента для периодического входного сигнала в виде прямоугольных импульсов с амплитудой  $4 \text{ мкА/см}^2$  и периодом  $20 \text{ мс}$  со скважностью 2.

Эксперименты продемонстрировали хорошее соответствие с результатами математического моделирования процесса передачи на компьютере, тем самым показали, что наличие радиоканала и возможные вносимые им возмущения в процесс передачи не сказываются на результатах взаимодействия нейрона-передатчика и нейрона-приемника. Это обстоятельство открывает возможности для использования БСС в интересах экспериментального исследования динамики и информационных процессов в многоэлементных нейроподобных ансамблях.

В **Заключении** суммируются полученные результаты и делаются выводы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе изучена возможность создания сверхширокополосных беспроводных сенсорных сетей медицинского назначения, использующих в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы. Особое внимание уделено распространению СШП хаотических сигналов в типичных условиях медицинского учреждения, созданию макета экспериментальной беспроводной сенсорной сети и исследованию её характеристик.

Получены следующие основные результаты.

1. Проведён обзор и анализ работ по созданию и испытаниям экспериментальных БСС медицинского назначения за последние годы. На основе проведённого анализа сформулированы требования к перспективным СШП БСС медицинского назначения. Для проверки практической реализуемости таких сетей предложено создать экспериментальную СШП беспроводную сеть.

2. В рамках создания сети впервые исследовано распространение сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов диапазона 3 – 5 ГГц в средах характерных для медицинских учреждений и определены типичные уровни затухания сигнала.

3. Разработана аппаратура и программное обеспечение для экспериментальной сверхширокополосной сети медицинского назначения.

4. Создан экспериментальный макет СШП БСС медицинского назначения.

5. Проведен комплекс измерений по проверке работоспособности и эффективности созданного макета при разных топологиях сети в широком диапазоне изменения объемов передаваемых данных. Результаты исследований характеристик предлагаемой сети полностью подтвердили правильность предложенной концепции и предложенных технических решений.

6. Показано, что возможности созданного макета как коммуникационной системы (среды) значительно шире, чем те, которые требуются для медицинских целей. В качестве примера продемонстрировано применение созданной

аппаратуры для исследования процессов передачи информации между нейроподобными элементами.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

### Публикации в журналах из списка ВАК РФ

1. Дмитриев А.С., Рыжов А.И. «Передача цифровой информации между нейроподобными элементами» // Радиотехника и электроника, 2010, Т. 55, №4. с. 459-464.
2. Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Рыжов А.И. «Прохождение сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов через щели в металлических поверхностях» // Радиотехника и электроника, 2012, Т. 57, №3, с. 349-352.
3. Рыжов А.И., Лазарев В.А., Мохсени Т.И., Никеров Д.В., Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Чубинский Н.П. «Ослабление сверхширокополосных хаотических сигналов диапазона 3–5 ГГц при прохождении через стены зданий» // Журнал радиоэлектроники, № 5, май 2012, <http://jre.cplire.ru/alt/may12/1/text.html>
4. Дмитриев А.С., Рыжов А.И., Кузьмин Л.В., Румянцев Н.В., Евсеев О.В., Мансуров Г.К. «Акустический датчик для беспроводных сенсорных сетей на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов» // Журнал радиоэлектроники, № 1, январь 2012, <http://jre.cplire.ru/koi/jan12/10/text.html>
5. Дмитриев А.С., Рыжов А.И., Мохсени Т.И. «Распространение сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов вблизи поверхности тела человека» // Успехи современной радиоэлектроники, 2013, №3, с. 67-71.
6. Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Герасимов М.Ю., Рыжов А.И. «Сверхширокополосные беспроводные нательные сенсорные сети» // Радиотехника и электроника, 2013, Т. 58, № 12, с. 1160-1170.
7. Мохсени Т.И., Рыжов А.И., Лазарев В.А., Андреев Ю.В. «Эксперименты по прохождению СШП хаотических сигналов от датчиков, расположенных внутри автомобиля» // Успехи современной радиоэлектроники, 2013, №3, с. 72-78.
8. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Рыжов А.И. «Экспериментальное исследование распространения сверхширокополосных хаотических сигналов в помещениях» // Успехи современной радиоэлектроники, 2013, №3, с. 55-66.

### Доклады на конференциях

- 1.
2. Dmitriev A.S., Ryzhov A.I. «Digital Information Transmission Between Neuron-like Elements», Proc. 17th Int. Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES 2009), Rapperswil, Switzerland, June 21-24, 2009.
3. Dmitriev A.S., Ryzhov A.I. «Information Transmission between Neuron-like Elements», Proc. PIERS-2009, Moscow, RUSSIA, August 18-21, 2009, pp. 466-469.

4. Рыжов А.И., Лазарев В.А. «Прохождение сверхширокополосного хаотического сигнала через щели в металлических поверхностях», Труды III Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Муром, 28 июня - 1 июля 2010 г., с. 187-191.
5. Рыжов А.И., Лазарев В.А., Мохсени Т.И., Никеров Д.В., Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Чубинский Н.П. «Прохождение СШП хаотических сигналов диапазона 3–5 ГГц через стены зданий», Доклады 5 Всероссийской науч.-техн. конф. «Радиолокация и радиосвязь», 21–25 ноября 2011 г., Москва, Россия, с. 447–451.
6. Рыжов А.И., Кузьмин Л.В., Румянцев Н.В., Евсеев О.В., Мансуров Г.К. «Разработка акустического датчика для беспроводных сенсорных сетей на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов», Доклады 5 Всероссийской науч.-техн. конф. «Радиолокация и радиосвязь», 21–25 ноября 2011 г., Москва, Россия, с. 516.
7. Годлин А.М., Рыжов А.И., Ефремова Е.В. «Программный комплекс моделирования и управления СШП сенсорной сетью», Доклады 5 Всероссийской науч.-техн. конф. «Радиолокация и радиосвязь», 21–25 ноября 2011 г., Москва, Россия, с. 516.
8. Рыжов А.И., Мохсени Т.И. «Распространение сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов вблизи поверхности тела человека», Доклады 6 Всероссийской науч.-техн. конф. «Радиолокация и радиосвязь», 19–22 ноября 2012 г., Москва, Россия.
9. Дмитриев А.С., Герасимов М.И., Рыжов А.И., Лазарев В.А. «Сверхширокополосные беспроводные нательные сенсорные сети», Труды V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред», 26.06-28.06.2012 г., Муром.
10. Андреев Ю.В., Кузьмин Л.В., Мохсени Т.И., Румянцев Н.В., Рыжов А.И. «Распространение сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в условиях домашних помещений и офисов», Труды V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред», 26.06-28.06.2012 г., Муром.
11. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Рыжов А.И. «Эксперименты по исследованию распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в помещениях», Труды науч. конф. «III Всероссийские Армандовские чтения», 26.06-28.06.2013 г., Муром.
12. Дмитриев А.С., Рыжов А.И., Лазарев В.А., Попов М.Г. «Экспериментальная медицинская беспроводная сенсорная сеть на основе сверхширокополосной хаотической радиосвязи», Доклады 9 Всероссийской науч.-техн. конф. «Радиолокация и радиосвязь», 2015, №1, Т. 60, с. 302-306.

#### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications. N.Y.: IEEE, 2012.
2. IEEE P802.15: Wireless Personal Area Networks. N.Y.:IEEE, 2009.

3. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks. N.Y.: IEEE, 2012.
4. Brennan T. A., Leape L. L., Laird N. M., Hebert L., Localio A. R., Lawthers A. G., Newhouse J. P., Weiler P. C., and Hiatt H. H. Incidence of adverse events and negligence in hospitalized patients. Results of the Harvard medical practice study I. // *New England Journal of Medicine*, 1991, 324(6), p. 370–376.
5. Leape L. L., Brennan T. A., Laird N., Lawthers A. G., Localio A. R., Barnes B. A., Hebert L., Newhouse J. P., Weiler P. C., and Hiatt H. H. The nature of adverse events in hospitalized patients. Results of the Harvard medical practice study II. // *New England Journal of Medicine*, 1991, 324(6), p.377–384.
6. *Guang-Zhong Yang*. Body Sensor Networks. – London:Springer, 2006.
7. Дмитриев А. С., Кислов В. Я. Стохастические колебания в радиофизике и электронике. - М.: Наука, 1989.
8. Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О. Динамический хаос как парадигма современных средств связи // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1997. № 10. С. 4-26.
9. Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О., Кяргинский Б.Е. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // *Радиотехника и электроника*, 2001, Т. 46, № 2, с. 224-233.
10. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В., Кузьмин Л.В., Лактюшкин А.М., Юркин В. Ю. Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети // *Радиотехника и электроника*, 2008, т. 53, №10, с. 1278-1289.
11. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю. Мультимедийные сенсорные сети на основе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов // *Радиотехника и электроника*, 2015, т. 60, №4, стр. 1-9.