

На правах рукописи



Борисов Василий Ильич

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Специальность 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского
назначения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: **Кубланов Владимир Семенович**,
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Обухов Юрий Владимирович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова Российской
академии наук, заведующий лабораторией методов
применения ЭВМ в научных исследованиях;

Веснин Сергей Георгиевич,
кандидат технических наук, ООО «Фирма РЭС»,
генеральный директор.

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственная инновационная фирма
«ГИПЕРИОН», г. Москва.

Защита состоится «15» февраля 2017 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.14 при Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана в зале Ученого Совета по адресу
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на
сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба
направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета
Д 212.141.14.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Самородов Андрей
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: Перспективным направлением по раннему выявлению признаков заболеваний является развитие технологий и методов динамической оценки функций органов и систем. Для мониторинга функциональных изменений в тканях головного мозга применяются различные нейрофизиологические методы, из которых наиболее перспективными являются (Кубланов В. С. дисс. д.т.н., 2009):

- неинвазивные или минимально инвазивные;
- позволяющие мониторировать процессы в режиме реального времени без ограничения продолжительности исследования;
- не использующие зондирующих сигналов и физических полей, которые изменяют электрофизические характеристики тканей мозга и влияют на изменение активности его отделов;
- не вызывающие у пациента дискомфорта при проведении исследований;
- доступные по стоимости.

Наиболее распространенными на сегодняшний день из инструментальных методов диагностики головного мозга являются электроэнцефалография, магнитоэнцефалография, позитронно-эмиссионная томография, функциональная магнитно-резонансная томография, однофотонная эмиссионная томография. К этим методам относятся и исследования собственного электромагнитного излучения тканей головного мозга, которые являются относительно новым методом, хотя первые работы появились еще в 70-х годах прошлого столетия.

Из возможных вариантов построения радиофизического комплекса в настоящей работе рассматривается вариант, в котором одним из информационных каналов является СВЧ радиотермограф, обеспечивающий регистрацию собственного электромагнитного излучения глубинных структур головного мозга в режиме мониторингирования функциональных процессов в его тканях. Такой режим предусматривает непрерывную регистрацию биомедицинских сигналов на интервале наблюдения, длительность которого определяется временем формирования физиологического феномена, изучаемого во время исследования. В контексте этого особая роль при таких исследованиях принадлежит функционально-нагрузочным пробам, которые в той или иной степени могут воздействовать на гомеостаз гемо- и ликвородинамики в тканях головного мозга и провоцировать физиологические изменения, являющиеся предметом исследования. Исходя из этого, при формировании тактико-технических требований к перспективному радиофизическому комплексу мы ограничили время исследований интервалом от 5 до 30 минут, в течение которого комплекс должен обеспечивать одновременную регистрацию биомедицинских сигналов радиометрического информационного канала и сигналов, формируемых в информационных каналах стандартной функциональной диагностики (например, в электроэнцефалографе, электрокардиографе, регистраторе кожногальванической реакции, фотоплетизмографе, пульсооксиметре и т.д.) с

целью получения интегративной оценки качества регуляции разных регуляторных систем организма, обеспечивающих гомеостаз головного мозга. Создание подобного многоканального радиофизического комплекса является актуальной задачей, решение которой должно повысить качество ранней диагностики.

Цель работы: Разработка многоканального радиофизического комплекса для функциональных исследований головного мозга.

Исходя из этого, был определен перечень **задач**, которые потребовалось решить для достижения поставленной в работе цели:

1. Провести анализ схемно-технических решений СВЧ радиотермографов, обеспечивающих регистрацию собственного электромагнитного излучения глубинных структур головного мозга в режиме мониторингирования и определить те характеристики, которые являются проблемными для реализации этого режима.

2. Определить состав радиофизического комплекса для функциональных исследований головного мозга, реализующего принципы комплексирования в режиме реального времени биомедицинских сигналов, характеристики которых определяются собственным электромагнитным излучением головного мозга и изменениями вегетативной и центральной нервных систем.

3. Разработать схемно-технические и программно-алгоритмические решения СВЧ радиотермографа, обеспечивающие обнаружение и количественные оценки информационных паттернов сигналов при мониторингировании функциональных изменений в тканях головного мозга.

4. Исследовать мультифрактальность кратковременных временных рядов (ВР) выходных сигналов СВЧ радиотермографа при их минимальной длительности 5 минут.

5. Разработать алгоритм и программное обеспечение для получения комплексных оценок мультифрактального формализма при совокупной обработке биомедицинских сигналов радиофизического комплекса.

6. Исследовать совокупные оценки мультифрактального формализма собственного электромагнитного излучения головного мозга и характеристик variability сердечного ритма (BCP) при клинической апробации радиофизического комплекса.

Методы исследования: Поставленные в работе задачи решались с использованием теории биотехнических систем, системного анализа, математического моделирования, СВЧ радиометрии, теории мультифрактального формализма и методов математической статистики при исследовании биомедицинских сигналов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Результаты исследований характеристик контактного СВЧ радиотермографа, предназначенного для мониторингирования собственного электромагнитного излучения головного мозга, позволившие оптимизировать характеристики антенны-аппликатора (АА) с контактными штырями, уточнить роль подшумливания границы АА-тело и обосновать схемно-техническое и программно-алгоритмические решения, обеспечивающие минимизацию ошибок оценок параметров электромагнитного излучения головного мозга от

коэффициента отражения АА с телом за счет учета потерь в элементах схемы термобаланса радиотермографа.

2. Получены подтверждения возможности описания кратковременных сигналов собственного электромагнитного излучения головного мозга как мультифрактальных сигналов и сделаны оценки их параметров, которые согласуются с соответствующими показателями Херста собственного электромагнитного излучения головного мозга и сигналов ВСР.

3. Предложен принцип комплексирования СВЧ радиотермографа и приборов для функциональной диагностики вегетативной и центральной нервных систем в многоканальном радиофизическом комплексе, а также соответствующая методика совместного анализа биомедицинских сигналов.

4. На основе предложенной методики получены количественные оценки влияния вегетативной регуляции на формирование собственного электромагнитного излучения головного мозга.

5. Обнаружена согласованность динамики изменения кросскорреляционного показателя Херста у больных пациентов до лечения и после реабилитационного курса с клиническими данными лечебного процесса.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- сформулированы принципы комплексирования многоканального СВЧ радиотермографа и измерителей характеристик вегетативной и центральной нервных систем в составе радиофизического комплекса;

- получены доказательства мультифрактальной природы кратковременных сигналов собственного электромагнитного излучения головного мозга;

- получены оценки роли вегетативной регуляции при формировании собственного электромагнитного излучения головного мозга;

- разработана математическая модель структуры АА-тело для исследований в среде FEKO с помощью гибридного метода моментов/метода конечных элементов различных вариантов вибраторных АА;

- изготовлены экспериментальные образцы вибраторной АА с контактными штырями и проведены их лабораторные испытания, которые подтвердили адекватность разработанной математической модели структуры АА-тело;

- разработаны программы для решения задачи минимизации ошибки оценки параметров электромагнитного излучения головного мозга от коэффициента отражения АА с телом;

- предложены схемно-технического решения, которые позволяют компенсировать потери в СВЧ элементах схемы термобаланса радиотермографа;

- получены оценки точности мультифрактальных методов с использованием модельных временных рядов разных типов генерации сигналов броуновского движения, которые применимы для исследования фрактальных характеристик реальных кратковременных биомедицинских сигналов;

- разработаны алгоритмы и их программное обеспечение в среде MATLAB для совокупного мультифрактального анализа выходных сигналов

СВЧ радиотермографа и приборов для функциональной диагностики вегетативной и центральной нервных систем многоканального радиофизического комплекса.

Внедрение результатов работы. Материалы диссертации использованы:

1. При модернизации радиофизического комплекса МРТРС.
2. В Республиканском клиническом госпитале ветеранов войн республики Марий Эл (г. Йошкар-Ола) при обработке экспериментальных данных, получаемых с помощью радиофизического комплекса МРТРС.
3. В Институте радиоэлектроники и информационных технологий-РтФ Уральского федерального университета при разработке магистерской программы «Интеллектуальные информационные системы и технологии функциональной диагностики и нейрореабилитации» по направлению подготовки 09.04.02. «Информационные системы и технологии».
4. При подготовке учебного пособия «Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB: учебное пособие/ В. С. Кубланов, В.И. Борисов, А.Ю. Долганов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 120 с.», рекомендованного методическим советом ИРИТ-РтФ УрФУ для студентов, обучающихся по направлениям магистратуры 09.04.02. «Информационные системы и технологии» и 11.04.01. «Радиотехника».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования характеристик оригинальной вибраторной АА с контактными штырями, лабораторные испытания которой подтвердили, что применение контактных штырей обеспечивает наименьшие изменения коэффициента отражения от границы АА-тело в режиме мониторингирования функциональных изменений в тканях головного мозга.
2. Новые результаты исследования влияния потерь в элементах схемы термобаланса СВЧ радиотермографа, в которых уточнена роль подшумливания перехода АА-тело. Результаты апробации схемно-технических решений, позволяющих минимизировать ошибки измерения радиояркостной температуры, связанные с потерями в СВЧ элементах схемы термобаланса радиометрического приемника и изменениями коэффициента отражения АА с телом.
3. Мультифрактальные оценки кратковременных сигналов собственного электромагнитного излучения головного мозга и их параметры, которые согласуются с соответствующими показателями сигналов ВСР.
4. Метод формирования данных о функциональном состоянии испытуемого с помощью оригинального программного обеспечения для вычисления и анализа мультифрактальных показателей биомедицинских сигналов радиофизического комплекса. Результаты оценки роли вегетативной регуляции в формировании собственного электромагнитного излучения головного мозга.

Степень достоверности результатов проведенных исследований: достоверность полученных в работе результатов подтверждается их согласованностью с фундаментальными положениями теории биотехнических систем, радиофизики, биофизики, нелинейной динамики; использованием

адекватных математических методов; результатами лабораторных и клинических исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях:

XI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Екатеринбург, 2012; X Российско-германской конференции по биомедицинской технике. Санкт-Петербург, 2014; XI Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». Суздаль, 2014; IV Всероссийской научной конференции «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии». Саратов, 2014; 7-th Annual International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering. Монпелье, Франция, 2015; 11-th German-Russian Conference on Biomedical Engineering. Ахен, Германия, 2015; 25-ой Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2015; International Conference on Biomedical Engineering and Computational Technologies (SIBIRCON). Новосибирск, 2015; 9-th International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing (BIOSIGNALS). Рим, Италия, 2016; II International Conference on Industrial Engineering. Челябинск, 2016; 12-th Russian German Conference on Biomedical Engineering. Суздаль, 2016.

Материалы работы обсуждены на научном семинаре факультета «Биомедицинская техника» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Личный вклад автора. Диссертация является итогом исследований автора. Все результаты исследований получены лично автором или при непосредственном его участии.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 21 работа, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, основных выводов, приложения и списка литературы. Основное содержание работы изложено на 172 страницах, включая 27 таблиц и 41 рисунок. Список литературы включает 220 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, раскрыты научная новизна и практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, сведения о структуре работы, ее апробации и реализации результатов.

В первой главе приведены материалы аналитического обзора современного состояния диагностических изделий медицинского назначения, использующих в качестве носителя информации собственное электромагнитное излучение (ЭМИ) головного мозга.

В общем случае, сигнал T_x на выходе СВЧ-радиометра пропорционален следующему соотношению:

$$T_x \propto |1 - \Gamma^2| \int_{4\pi} T_{\text{я}}(\Omega) F_n(\Omega) d\Omega, \quad (1)$$

где $T_{\text{я}}(\Omega)$ – радиояркая температура тканей мозга, $F_n(\Omega)$ – радиометрическая весовая функция АА, определяемая как весовая функция радиояркой температуры $T_{\text{я}}$ от телесного угла (Ω) , Γ^2 – коэффициент отражения на границе контактной АА и тела.

Временные изменения оценки радиояркой температуры T_x можно представить как

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_x}{\partial t} = & -\text{sgn}(1 - \Gamma^2) \frac{\partial \Gamma^2}{\partial t} \int_{4\pi} T_{\text{я}}(\Omega) F_n(\Omega) d\Omega + \\ & + |1 - \Gamma^2| \left(\int_{4\pi} \left(\frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial \Omega} \frac{\partial \Omega}{\partial t} F_n(\Omega) + \frac{\partial F_n}{\partial \Omega} \frac{\partial \Omega}{\partial t} T_{\text{я}}(\Omega) \right) d\Omega \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где для определения этих изменений требуется определить следующие параметры:

1. $\frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial t}$ – исследование изменений информационных характеристик сигнала собственного ЭМИ головного мозга;
2. $\frac{\partial F_n}{\partial t}$ – разработка АА для длительного мониторинга собственного ЭМИ головного мозга;
3. $\frac{\partial \Gamma^2}{\partial t}$ – разработка схемотехнического решения входного тракта СВЧ-радиометра для обеспечения измерений радиояркой температуры с заданной погрешностью.

Эти особенности собственного ЭМИ головного мозга определили особенности схемно-технических решений радиофизического комплекса. При этом комплекс рассматривается как часть биотехнической системы (БТС), в которой СВЧ радиотермограф является одним из информационных каналов. Другими информационными каналами являются приборы стандартной функциональной диагностики (электроэнцефалограф, электрокардиограф, регистратор кожногальванической реакции, фотоплетизмограф, пульсооксиметр и т.д.). Так как собственное ЭМИ головного мозга является следствием теплового броуновского движения заряженных частиц, которое модулируется функциональными процессами в его тканях, то этот сигнал, по всей видимости, имеет фрактальную самоподобную природу, вызванную цикличностью процессов динамических систем регулирования гомеостаза. В известных работах для оценки характеристик сигналов собственного ЭМИ, как правило, применяются статистические, спектральные, корреляционные и информационные методы. В них не учитываются мультифрактальные свойства исследуемого процесса. Поэтому при исследовании этой БТС целесообразно применять методы мультифрактального анализа. Структура такой БТС представлена в диссертации на Рис. 1.1.

В известных СВЧ радиотермографах (радиотермометрах) мониторинг и анализ функциональных процессов головного мозга указанными выше методами не проводится. Поэтому в последующих разделах работы представлены новые конструкторские решения СВЧ-радиотермографа, предназначенного для длительного мониторинга функциональных изменений

процессов регуляции головного мозга, а также представлены новые методы анализа данных биомедицинских сигналов радиофизического комплекса на основе теории мультифрактального анализа (одного из методов нелинейной динамики).

В первой главе проведен анализ схемно-технических решений СВЧ радиотермографов для мониторингирования собственного электромагнитного излучения глубинных структур головного мозга и современных методов получения данных о функциональном состоянии вегетативной нервной системы человека. Определены актуальные проблемы, решение которых позволяет выполнить задачи, поставленные в данной работе:

1. Поиск новых схемно-технических решений в создании СВЧ-радиометра для длительного мониторингирования функциональных процессов головного мозга.

2. Разработка предложений для обеспечения комплексирования СВЧ радиотермографа и приборов для функциональной диагностики вегетативной и центральной нервной систем в многоканальном радиофизическом комплексе.

3. Разработка новых алгоритмов совместной обработки сигналов информационных каналов радиофизического комплекса, отражающих процессы регуляции в тканях головного мозга и вегетативной нервной системы, на основе методов нелинейной динамики.

Во второй главе приведены результаты анализа известных схемно-технических решений СВЧ радиометров и определены проблемные вопросы, возникающие при контактных исследованиях собственного ЭМИ головного мозга. Представлены результаты математического моделирования исследования характеристик штыревых вибраторных АА, предназначенных для длительного мониторинга функциональных процессов головного мозга.

В работе рассмотрены такие АА, конструкция которых может быть приспособлена для приема излучения тканей головного мозга независимо от размера волосяного покрова. На Рис. 2.1 представлена схема плоской версии биконической вибраторной АА. Одной из задач моделирования такой антенны является исследование влияния параметров d , h , α , обозначенных на Рис. 2.1, на характеристики АА. Расчет модели АА проводился численно с помощью гибридного метода МОМ/FEM (метод моментов / метод конечных элементов) посредством программы трехмерного электромагнитного моделирования FEKO (версии 7.0).

Модель головы в исследовании представлена плоскопараллельной комбинацией диэлектрических образований, электрофизические характеристики которых определяются соответствующими характеристиками скальпа, кортикальной кости, спинномозговой жидкости, серого и белого вещества мозга. Геометрические и электрофизические характеристики образований представлены в диссертации в Таблицах 1 и 2. Моделирование проводилось в диапазоне частот от 650 до 850 МГц. Результаты моделирования позволили установить параметры АА, при которых напряженность электромагнитного поля максимальна: $\alpha = 67,4^{\circ}$; $d = 3,8$ мм; $h = 26,0$ мм.

Вблизи границы АА-тело присутствует продольная компонента электрического поля, амплитуда поля вдоль оси АА имеет максимальное

значение. Поскольку поле вдоль оси плеча вибратора убывает обратно пропорционально кубу расстояния от АА, то на его значение (а значит и на приемные свойства АА) могут оказывать влияние мельчайшие неоднородности между АА и кожей – волосы, неплотное прилегание к телу из-за рельефа головы, капли пота и т.д. Поэтому потребовалось изменить структуру АА, чтобы уменьшить влияние указанных выше неоднородностей между АА и кожей головы. Из всего многообразия АА, которые применяются для измерения собственного электромагнитного излучения биологических тканей, были выбраны АА, конструкция которых приспособлена для приема излучения с волосяным покровом головы без каких-либо ограничений на его размеры.

Для этого на каждом вибраторе размещаются проводящие штыри, обеспечивающие контакт АА с кожей. В работе получены оценки зависимости электромагнитного поля от длины l штырей. На Рис. 2.9 представлены графики зависимости распределения нормированного значения напряженности электромагнитного поля для модели головы-АА в зависимости от длины $l=1-5$ мм штырей.

Проведены лабораторные испытания экспериментальных образцов АА с помощью векторного анализатора цепей National Instruments PXIe-5630. Их результаты, представленные на Рис. 2.11, показали, что коэффициент отражения изменяется с начала исследования до 30 минуты для АА без контактных штырей на $[0,12]$, в случае АА с контактными штырями – на $[0,06]$. Проведенные испытания свидетельствуют, что в исследуемом диапазоне 650–850 МГц для АА со штырями длиной 5 мм изменение коэффициента отражения в течение 30 минут меньше в два раза, чем у АА без штырей.

Далее в главе рассмотрены вопросы, связанные с технической реализацией контактных СВЧ радиометров. Для анализа выбран СВЧ радиометр со схемой термобаланса компенсационного типа, структурная схема которого, по существу, является схемой К.М. Ludeke (Ludeke К.М., 1979). Подобные решения применяются большинством разработчиков контактных СВЧ радиометров (радиотермометров).

В работе рассмотрен один из возможных вариантов построения схемы термобаланса СВЧ радиотермографа, в которой ошибку измерения радиояркостной температуры тела T_x можно обеспечить в заданных пределах. На Рис. 2.13 приведена эквивалентная структурная схема такого радиотермографа, который далее будем называть модифицированным.

Ключевым вопросом любого радиометрического измерения является обеспечение минимальной ошибки оценки радиояркостной температуры T_x , т.е. разности между T_x и ее оценкой, реализуемой СВЧ радиотермографом. В нашем случае такой оценкой является температура согласованной нагрузки циркулятора $T_{сн}$. Контактный модифицированный СВЧ радиотермограф является также модуляционным, но в отличие от схемы К.М. Ludeke:

- между модулятором и циркулятором включены последовательно соединенные коаксиальный кабель и аттенюатор;
- модулятор является не выключателем, а переключателем и в режиме, когда АА отключена от радиометрического приемника, выполняет функцию короткозамыкателя для коаксиального кабеля.

В работе представлены оценки численного моделирования в среде MATLAB ошибки измерений флуктуаций радиояркой температуры тела T_x , определяемой как $\varepsilon = |T_x - T_{CH}|$ при разных значениях потерь в его элементах и разных значениях коэффициента отражения Γ_x^2 от границы АА – тело. Полученные в ходе моделирования результаты свидетельствуют, что во всех случаях уровней потерь в фидере имеется постоянная во времени добавка, которая не влияет на функциональный вид выходного сигнала. Следовательно, эту добавку можно скомпенсировать с учетом уровня ошибки измерения при помощи калибровки СВЧ радиотермографа. Для этого в работе введено калибровочное слагаемое:

$$\Delta T = T_A \left(1 - \frac{(1 - \Gamma_x^2) C_1}{C_2 [1 - C_3 \Gamma_x^2]} \right) - \frac{(T_\gamma)_{эл}}{C_2 [1 - C_3 \Gamma_x^2]}, \quad (3)$$

данное слагаемое включает в себя известные параметры температуры элементов T_γ , потерь в элементах C_1, C_2, C_3 , и коэффициента отражения Γ_x^2 . На Рис. 2.27 и в Таблице 4 представлены модельные оценки зависимости чувствительности СВЧ-радиотермографа от коэффициента отражения для разных уровней потерь в кабеле.

Представленные оценки показывают, что введение в оценку температуры согласованной нагрузки калибровочного слагаемого позволяет добиться более высокой точности результатов измерения (менее флуктуационной чувствительности СВЧ радиотермографа). Исходя из этого определим чувствительность такого СВЧ радиотермографа как:

$$\varepsilon = T_x - (T_{CH} + \Delta T). \quad (4)$$

Проведенные в настоящей главе результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложена новая конструкция вибраторной АА с контактными штырями. Методами математического моделирования исследованы характеристики этой АА и показано, что такая АА может применяться для длительного мониторингирования функциональных процессов в тканях головного мозга.

2. Результаты исследований по п. 1 подтверждены лабораторными испытаниями.

3. Предложена структурная схема модифицированного СВЧ-радиометра и исследованы оценки влияния на ошибку измерения радиояркой температуры потерь в СВЧ элементах схемы термобаланса и коэффициента отражения АА с телом. Показано, что для предложенных схемотехнических решений конструкции СВЧ-радиометра существуют уровни коэффициента отражения и потерь в фидере при которых определены минимальные значения ошибки измерения СВЧ-радиометра ($T_{CH} - T_x < 0,05$ К).

В третьей главе приведены результаты исследований условий применения методов мультифрактального анализа для кратковременных временных рядов (ВР) модельных сигналов фрактального броуновского движения. Проведен анализ, показавший, что из известных методов мульти- и монофрактального формализма для оценки кратковременных ВР для решения

поставленной задачи наибольший интерес представляют методы мультифрактального флуктуационного (MFDFA) и кросскорреляционного (MFCCA) анализа. Первым шагом модельного исследования было доказательство точности мультифрактальных оценок для значений, полученных методом MFDFA (Таблица 6). Для решения этой задачи были использованы следующие модели генераторов ВР:

- основанный на вейвлет-преобразовании;
- метод циркулянтных матриц.

Вторым этапом модельных исследований является определение стабильности мультифрактальных оценок при добавлении к исходному сигналу белого шума (Таблицы 7 и 8).

Выполненные в третьей главе диссертации исследования показали, что:

1. Из известных методов мульти- и монофрактального формализма для оценки кратковременных биомедицинских сигналов для решения поставленной задачи наибольший интерес представляют методы мультифрактального флуктуационного и кросскорреляционного анализа, которые не имеют ограничения на стационарность и зашумленность исследуемых ВР. Такой подход позволяет получать кросскорреляционные оценки нескольких сигналов, регистрируемых одновременно.

2. Исследована точность мультифрактальных методов MFDFA и MFCCA с использованием модельных ВР сигналов броуновского движения разных типов генерации, усредненных для трехсот реализаций каждого задаваемого значения задаваемого показателя Херста $h \in [0,1-0,9]$ и усредненных для длительностей 1024, 2048, 4096, соответствующих кратковременным ВР биомедицинских сигналов. В первом случае (без зашумления сигнала) показано, что возвращаемые значения показателя Херста методом MFDFA имеют отклонения от задаваемых значений показателя Херста не более чем 0,04. Для интегрированных ВР отклонения от теоретически ожидаемых не превышают 0,07 в среднем. Это свидетельствует о высокой точности исследуемых мультифрактальных методов. Во втором случае, получены оценки зашумленных сигналов ФБД, которые показывают, что в области анти-персистентных значений показателя Херста ($h < 0,5$) более точной моделью генерации ВР является метод циркулянтных матриц. Для области персистентных значений показателя Херста ($h > 0,5$) более точные значения имеет метод вейвлет-генератора броуновского движения.

3. Анализ модельных сигналов с применением методов MFDFA и MFCCA показал, что эти методы могут быть использованы для оценки кратковременных биомедицинских сигналов многоканального радиофизического комплекса.

В четвертой главе представлены результаты применения мультифрактального анализа при функциональных исследованиях собственного электромагнитного излучения головного мозга и вариабельности сердечного ритма. Сигнал вариабельности сердечного ритма является примером использования в радиофизическом комплексе одного из информационных каналов, формируемых стандартными приборами функциональной диагностики. Выбор его в данном исследовании не случаен.

Известно, что надсегментарные отделы вегетативной нервной системы участвуют в организации мозгового кровообращения (Москаленко Ю. Е., 1992). Роль вегетативной регуляции при формировании функциональных процессов в тканях головного мозга недостаточно изучена, хотя по данным клинических исследований от ее активности зависит эффективность реабилитации при сосудистых поражениях мозга. Тем более нет данных о влиянии вегетативной регуляции на собственное ЭМИ головного мозга.

Для этого разработаны алгоритм и программное обеспечение для получения комплексных оценок мультифрактального формализма при совокупной обработке исследуемых биомедицинских сигналов (Рис. 4.7 и 4.8). Проведено исследование мультифрактальности биомедицинских сигналов радиофизического комплекса при совокупных исследованиях ВСР и собственного ЭМИ головного мозга.

Измерения биомедицинских сигналов проводились с помощью радиофизического комплекса МРТРС в двух функциональных состояниях пациентов: в функциональном покое (F) и при выполнении пассивной антиортостатической нагрузки (A). Время каждого из функциональных состояний равнялось 300 с. Запись собственного электромагнитного излучения проводилась одновременно в теменных зонах левого и правого полушарий головного мозга. Одновременно регистрировались данные variability сердечного ритма. Для изучения мультифрактальных свойств кратковременных биомедицинских сигналов методами MFDFA и MFCCA в данной работе использованы следующие временные окна: (1-10), (10-20), (20-30), (30-40), (40-50), (50-60), (60-70), (70-80), (80-90) и (90-100) с. Данные временные окна ограничены снизу влиянием интерполяционных шумов (менее секунды), а сверху – соотношением $[N/3]$, где N – длина ВР.

Диагностическая возможность вычисляемых мультифрактальных характеристик для этих временных окон в состоянии функционального покоя и в состоянии антиортостатической нагрузки определялась с помощью критерия Бленда-Альтмана (Гланц С. А., 1998). Методика оценки с использованием критерия Бленда-Альтмана следующая: для каждой пары величин, рассчитанных для обоих сигналов, вычислялась их разность. Далее определяется зависимость этого расхождения от величины параметра, используя в качестве оценочного критерия среднее значение пары величин M . Среднее значение разности характеризует систематическое расхождение $\langle \Delta \rangle$, а стандартное отклонение разности ($1,96 \cdot \sigma$) – степень разброса результатов.

Полученные в работе результаты (Таблицы 14 и 15) имеют минимальное значение уровня систематического расхождения сигналов ВСР и собственного ЭМИ головного мозга, что характеризует подобие динамических изменений, происходящих в этих сигналах. В этом случае можно считать, что роль вегетативной регуляции, определяемой характеристиками ВСР, в формировании собственного ЭМИ является высокой. Анализ биомедицинских сигналов многоканального радиофизического комплекса показал, что:

1. Процессы, характеризующие активность симпатического отдела ВНС с периодами флуктуаций в диапазоне от 6,5 до 25 с и динамики транспорта

жидкости в межклеточных и внутриклеточных пространствах тканей головного мозга с периодами флуктуаций в диапазоне от 20 до 40 с, подобны.

2. Процессы, характеризующие активность центральных эрготропных и гуморально-метаболических механизмов регуляции сердечного ритма, определяемых очень низкочастотными флуктуациями ВСР в диапазоне от 25 до 300 с, и процессов термодинамической регуляции в тканях головного мозга с периодами флуктуаций от 50 до 70 с, подобны.

3. Определены значения уровней систематического расхождения мультифрактальных оценок сигналов ВСР и собственного ЭМИ головного мозга при их совокупных исследованиях в диапазонах, которые указаны в п.п. 1 и 2 не превышают 0,04 для ширины мультифрактального спектра и 0,05 для показателя Херста. Несмотря на то, что сигналы собственного электромагнитного излучения тканей головного мозга и variability сердечного ритма имеют разную регуляторную природу, полученные изменения мультифрактальных оценок этих процессов позволяют выявить общие физиологические механизмы, участвующие в организации этих изменений.

4. Следовательно, сигналы собственного электромагнитного излучения головного мозга имеют мультифрактальную природу.

В пятой главе приведены результаты применения методов мультифрактального анализа для совместной обработки кратковременных биомедицинских сигналов радиофизического комплекса по данным исследований, проведенных в Свердловском областном клиническом психоневрологическом госпитале для ветеранов войн (г. Екатеринбург). Исследования выполнены на следующих группах пациентов:

- первая группа – 20 здоровых в неврологическом плане пациентов-добровольцев в возрасте от 18 до 20 лет;
- вторая группа – 14 больных, страдающих ишемическим инсультом (до реабилитационного курса лечения);
- третья группа – 7 больных из второй группы, страдающих ишемическим инсультом (после реабилитационного курса лечения), у которых наблюдается клинически доказанное улучшение (Таблица 16).

Для мультифрактальных оценок сигналов ВСР и собственного ЭМИ, полученных методом MFDFA, в каждом из временных окон вычислялись разности показателей Херста в двух функциональных состояниях: $H_{2xyF}^{BCP-ЭМИ} - H_{2xyA}^{BCP-ЭМИ}$ (Таблицы 17 и 18). Аналогичная оценка представлена для кросскорреляционных показателей, полученных методом MFCCA. Оценки систематических расхождений, полученных с помощью критерия Бленда-Альтмана для разности кросскорреляционных показателей Херста $H_{2xyF}^{BCP-ЭМИ} - H_{2xyA}^{BCP-ЭМИ}$ сигналов ВСР и собственного ЭМИ в двух функциональных состояниях пациентов представлены в Таблице 19.

Динамика изменений уровня систематического расхождения кросскорреляционного показателя Херста для сигналов ВСР и собственного ЭМИ головного мозга представлена на Рис. 5.1. Из приведенных в Таблице 19 и на Рис. 5.1 данных следует, что оценки разности кросскорреляционных

показателей Херста $H_{2xyF}^{BCP-ЭМИ} - H_{2xyA}^{BCP-ЭМИ}$ сигналов ВСР и собственного ЭМИ в двух функциональных состояниях пациентов имеют низкий уровень систематического расхождения (не более $|0,01|$) во временных окнах (20-40) и (60-70) с у пациентов первой группы.

У пациентов второй группы оценки разности кросскорреляционных показателей Херста в указанных временных окнах имеют большие значения $|0,3|$ по сравнению с показателями пациентов первой группы. Оценки разности кросскорреляционных показателей Херста у пациентов третьей группы во временных окнах (20-40) и (60-70) с имеют меньшие значения $|0,2|$ по сравнению с показателями пациентов второй группы. Эти данные можно рассматривать в качестве оценки эффективности реабилитационного курса у пациентов с клинически доказанным улучшением (третья группа пациентов).

В работе представлены данные (Таблицы 21-27) мультифрактального анализа флуктуаций собственного ЭМИ головного мозга и сигналов ВСР, полученные с использованием метода MFSSA для третьей группы пациентов после прохождения реабилитационного курса с использованием методики динамической коррекции активности симпатической нервной системы. Анализ этих оценок показал, что динамика расхождения кросскорреляционного показателя Херста совпадает с клиническими данными при лечении больных, отражает особенности разных клинических случаев, и может являться основанием для прогнозирования и возможной коррекции лечебного курса пациентов.

Анализ кратковременных сигналов ВСР и собственного ЭМИ головного мозга с применением методов флуктуационного и кросскорреляционного мультифрактального анализа позволил получить новые знания об исследуемых биомедицинских сигналах, которые свидетельствуют, что:

1. Для временных окон (20-40) и (60-70) с в функциональном покое и при выполнении пассивной антиортостатической пробы систематическое расхождение разности показателей Херста этих биомедицинских сигналов минимально для здоровых в неврологическом плане пациентов-добровольцев. Для больных, страдающих ишемическим инсультом, эти показатели имеют существенно большие значения до реабилитационного курса лечения. После реабилитационного курса лечения у пациентов из этой группы, у которых наблюдается клинически доказанное улучшение, систематическое расхождение разности показателей Херста этих биомедицинских сигналов уменьшается.

2. Применение мультифрактального формализма позволило доказать, что при минимальном значении уровня систематического расхождения сигналов ВСР и собственного ЭМИ головного мозга динамические изменения в этих сигналах происходят подобно. В этом случае можно считать, что роль вегетативной регуляции, определяемой характеристиками ВСР, в формировании собственного ЭМИ является высокой. Предложенный подход можно использовать для управления лечебным процессом.

3. Динамика расхождения оценок кросскорреляционного показателя Херста совпадает с клиническими изменениями при лечении больных, страдающих ишемическим инсультом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ схемно-технических решений СВЧ радиотермографов, определены актуальные проблемы поиска новых схемно-технических решений в создании СВЧ-радиометра для длительного мониторингирования функциональных процессов головного мозга в части разработки АА и уменьшения ошибки измерения.

2. Исследованы характеристики АА, предназначенной для длительного мониторинга собственного ЭМИ головного мозга, и оптимизированы ее конструкторско-технологические характеристики для обеспечения регистрации излучения в режиме мониторингирования функциональных изменений в тканях головного мозга. Результаты подтверждены лабораторными исследованиями.

3. Получены результаты ошибки измерения радиояркостной температуры от потерь в СВЧ элементах схемы термобаланса и коэффициента отражения АА с телом. Предложено схемно-техническое решение, позволяющее минимизировать эту ошибку.

4. Предложен принцип комплексирования СВЧ радиотермографа и приборов для функциональной диагностики вегетативной и центральной нервных систем в многоканальном радиофизическом комплексе и алгоритм совокупного анализа его биомедицинских сигналов.

5. Разработан алгоритм и программное обеспечение для получения комплексных оценок мультифрактального формализма при совокупной обработке биомедицинских сигналов радиофизического комплекса

6. Сделаны оценки параметров биомедицинских сигналов многоканального радиофизического комплекса с помощью мультифрактального анализа для модельных сигналов броуновского движения и реальных сигналов группы здоровых испытуемых и больных.

7. Впервые получены доказательства мультифрактальной природы кратковременных сигналов собственного электромагнитного излучения головного мозга. Показано подобие оценок ширины мультифрактального спектра и показателя Херста собственного электромагнитного излучения головного мозга и сигналов ВСР.

8. Проведены пилотные клинические исследования сигналов собственного электромагнитного излучения головного мозга и ВСР, которые позволили оценить методами совокупного мультифрактального анализа роль вегетативной регуляции в формировании собственного электромагнитного излучения головного мозга. Динамика расхождения оценок кросскорреляционного показателя Херста совпадает с клиническими изменениями при лечении больных, страдающих ишемическим инсультом.

9. Результаты диссертационной работы целесообразно применять для создания перспективных многоканальных радиофизических комплексов, предназначенных для проведения функциональных исследований головного мозга.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кубланов В. С., Борисов В. И. СВЧ-радиометры для функциональных исследований головного мозга // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2012. Спецвыпуск «60 лет ИРИТ-РтФ УрФУ». С.41–49. (0,48 п.л. / 0,24 п.л.).
2. Кубланов В. С., Борисов В. И., Поршнева С. В. Особенности применения методов нелинейной динамики для анализа сигналов вариабельности сердечного ритма // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 8. С. 30–37. (0,52 п.л. / 0,17 п.л.).
3. Борисов В. И., Кубланов В. С. Применение мультифрактального анализа кратковременных рядов вариабельности сердечного ритма при оценке результатов лечения артериальной гипертензии // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 3. С. 134–143. (0,46 п.л. / 0,23 п.л.).
4. Кубланов В. С., Борисов В. И., Долганов А. Ю. Применение мультифрактального формализма при исследовании роли вегетативной регуляции в формировании собственного электромагнитного излучения головного мозга // Медицинская техника. 2016. №1. С. 21–24. (0,50 п.л. / 0,17 п.л.).
5. Kublanov V. S., Borisov V. I., Dolganov A. Yu. The interface between the brain microwave radiation and autonomic nervous system // 7-th Annual International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, Montpellier, France. 2015. P. 922–925. (0,45 п.л. / 0,15 п.л.).
6. Kublanov V. S., Borisov V. I., Dolganov A. Yu. Summary Processing of Radiophysical Complex MRTHR Signals // Proceedings of the 9-th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies BIOSIGNALS. Rome, Italy. 2016. Vol. 4. P. 143–149. (0,67 п.л. / 0,22 п.л.).
7. Kublanov V. S., Borisov V. I. Features of the radiophysical complex MRTHR signals in research of functional processes in the brain tissues // Conference Proceedings International Conference on Biomedical Engineering and Computational Technologies (SIBIRCON). Novosibirsk. 2015. P. 93–98. (0,61 п.л. / 0,31 п.л.).
8. Борисов В. И. Моделирование собственного электромагнитного излучения головного мозга // Сборник тезисов, материалы Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых. Екатеринбург. 2011. Т. 1. С. 377–378. (0,16 п.л. / 0,16 п.л.).
9. Борисов В. И. Моделирование тепловых процессов головного мозга // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции Актуальные проблемы науки: ч. 3. Тамбов. 2011. С. 32–35. (0,11 п.л. / 0,11 п.л.).
10. Борисов В. И., Попов А. А., Кубланов В. С. Методы нелинейной динамики в задаче исследования функциональных систем человека анализа // Труды XI Международной научно-технической конференции Физика и технические приложения волновых процессов. Екатеринбург. 2012. С. 348–349. (0,14 п.л. / 0,05 п.л.).
11. Borisov V. I., Kublanov, V. S Using of multifractal analysis to evaluate short-term series of heart rate variability // Conference Proceedings 10-th Russian German Conference on Biomedical Engineering. Saint Petersburg. 2014. P. 46–47. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.).
12. Борисов В. И., Кубланов В. С. Применение методов нелинейной динамики при исследовании кратковременных рядов биомедицинских сигналов

при функциональных нагрузках // Труды XI Международной научно-технической конференции с элементами научной молодежной школы Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии. Владимир. 2014. С. 114–116. (0,20 п.л. / 0,10 п.л.).

13. Борисов В. И., Долганов А. Ю., Григорьева А. А. Сравнение методов мультифрактального анализа для оценки кратковременных сигналов variability сердечного ритма // Сборник материалов Всероссийской молодежной конференции «Современные биоинженерные и ядерно-физические технологии в медицине». Саратов. 2014. Т. 1. С. 104–108. (0,16 п.л. / 0,05 п.л.).

14. Борисов В. И., Лабутина А. Ю. Анализ значимости оценок показателя Херста сигналов variability сердечного ритма // Сборник материалов IV Всероссийской научной конференции «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии». Саратов. 2014. Т. 1. С. 55–58. (0,17 п.л. / 0,08 п.л.).

15. Борисов В. И., Лабутина А. Ю., Кубланов В. С. Оценка сигналов variability сердечного ритма с помощью монофрактального анализа // Вторая Международная молодежная научная конференция Физика. Технологии. Инновации. Екатеринбург. 2015. С. 276–277. (0,38 п.л. / 0,18 п.л.).

16. Borisov V. I., Kublanov V. S. Features of multifractal analysis application for estimations of microwave brain radiation signals // Conference Proceedings 11-th German Russian Conference on Biomedical Engineering. Aachen, Germany. 2015. P. 119–122. (0,36 п.л. / 0,18 п.л.).

17. Кубланов В. С., Борисов В. И. Радиофизический комплекс для исследований процессов регуляции головного мозга // 25-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь. 2015. Т. 2. С. 1079–1080. (0,23 п.л. / 0,12 п.л.).

18. Кубланов В. С., Борисов В. И., Долганов А. Ю. Особенности применения мультифрактального анализа для оценки сигналов собственного электромагнитного излучения головного // 25-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь. 2015. Т. 2. С. 1053–1054. (0,22 п.л. / 0,08 п.л.).

19. Кубланов В. С., Борисов В. И., Долганов А. Ю. Применение мультифрактального анализа для совокупных исследований биомедицинских сигналов // 25-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь. 2015. Т. 2. С. 1061–1062. (0,24 п.л. / 0,08 п.л.).

20. Modelling and Analysis of Bow-Tie Antenna Properties for the Brain Microwave Radiometry / V. I. Borisov [et al.] // Proceedings of the 2-nd International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk. 2016. P. 1–4. (0,31 п.л. / 0,08 п.л.).

21. Borisov V. I., Kublanov V. S. Multichannel radiophysical complex for functional studies of the human brain // Conference Proceedings 12-th Russian German Conference on Biomedical Engineering. Suzdal. 2016. P. 231–234. (0,29 п.л. / 0,15 п.л.).