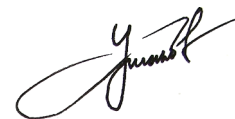


Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»

На правах рукописи



УШАКОВ Юрий Владимирович

**Распространение сигналов в нелинейных
зашумлённых средах на примере модели
нейронного ансамбля слухового анализатора**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2010

Работа выполнена на кафедре математики радиофизического факультета
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского.

Научный руководитель: *кандидат физико-математических наук,
доцент А. А. Дубков.*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук,
профессор Г. В. Осипов,
доктор физико-математических наук,
профессор А. М. Силаев.*

Ведущая организация: *Саратовский государственный универ-
ситет им. Н. Г. Чернышевского.*

Защита состоится «22» декабря 2010 г. в 15:00 часов на заседании диссер-
тационного совета Д 212.166.07 при *Нижегородском государственном уни-
верситете им. Н. И. Лобачевского*, по адресу: 603950, г. Нижний Новгород,
ГСП-20, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, радиофизический факультет, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *Нижегородского государ-
ственного университета*.

Автореферат разослан «16» ноября 2010 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печат-
ью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря
диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

к.ф.-м.н., доцент



В. В. Черепенников

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Исследование эффектов взаимодействия сигналов и шумов на нелинейностях различных радиофизических систем не теряет своей актуальности в течение многих десятков лет. Мощная теоретическая база таких исследований была заложена в XX-м веке в трудах видных отечественных (Котельников В.А., Колмогоров А.Н., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И., Рытов С.М., Левин Б.Р., Малахов А.Н.) и зарубежных (Райс С., Винер Н., Шеннон К., Миддлтон Д.) учёных. Характерной особенностью разработанных методов статистической радиофизики является их применимость в системах самой разнообразной природы, начиная с радиотехнических устройств и заканчивая живыми белковыми структурами.

Ярким примером сложной зашумлённой нелинейной системы, обрабатывающей образы акустических, оптических и пр. сигналов, является мозг как млекопитающих, так и гораздо менее сложных организованных живых существ, например, моллюсков, насекомых и т.п. В то же время, удивительная скорость и точность обработки информации нейросистемами при существенном влиянии внутренних и внешних источников шума с давних пор привлекает внимание теоретиков и разработчиков радиофизической аппаратуры, что привело к активному проникновению методов статистической радиофизики в нейронауку [1]. Говоря о нейронных ансамблях в целом, следует отметить, во-первых, сложность их элементарных составляющих — нервных клеток (нейронов), математические модели которых сами по себе являются многомерными системами со сложной многомасштабной динамикой, и, во-вторых, сложность структур, образуемых нейронами при помощи возбудимых отростков, обеспечивающих нелокальные связи между нервными клетками. Динамика моделей нейронов долгое время изучалась без привлечения стохастических дифференциальных уравнений, вследствие усложнения исследовательской задачи введением шума. Кроме того, было недостаточно ясно, как корректно вводить шумы в модели нейронов и нейронных систем. Тем не менее, экспериментальные данные показывали необходимость учёта шумов для адекватного описания нейронов, находящихся в естественной среде существования.

В начале 80-х годов XX-го века открытие явления стохастического резонанса [2], ставшего первым замеченным проявлением конструктивной роли

шума, стимулировало активные теоретические исследования случайных процессов в различных нелинейных системах, включая нейроподобные системы. При этом многие исследователи распространения сигналов в зашумлённых нейросистемах ограничивались изучением модели отдельного зашумлённого нейрона [1, 3, 4]: её вероятностных характеристик, условий наблюдения стохастического резонанса и т.п. Следует заметить, что теоретические исследования подобного рода встречаются немало трудностей даже для сравнительно простых моделей нейронов, тогда как в случае моделей, приближенных к реальным нервным клеткам, исследования выполняются, как правило, путём численного моделирования [5, 6].

Ряд недавних работ [7–10] посвящен изучению не отдельных зашумлённых нейронов, а составленных из них несложных конфигураций, в частности, двухкаскадных структур, на выходе которых рассматриваются вероятностные характеристики импульсного сигнала в зависимости от параметров входных воздействий. Однако, в этих работах исследуются весьма частные статистические характеристики, описывающие случайный процесс (например, поведение одного пика вероятностного распределения межимпульсных интервалов или одной спектральной компоненты в зависимости от интенсивности шума), и описание эффектов даётся на основании результатов численного моделирования. *Таким образом, актуальным представляется исследование аналогичных многокаскадных зашумлённых нейроподобных систем и механизмов преобразования сигналов в них в более детальном теоретическом плане, что выполнено в настоящей работе.*

С другой стороны, существует на первый взгляд далёкая от современной радиофизики научная область, занимающаяся вопросами восприятия музыки млекопитающими. Одной из центральных в ней является проблема разделения всех музыкальных созвучий (аккордов) на два класса: гармоничные (консонансные) и дисгармоничные (диссонансные). Современные нейрофизиологические эксперименты показывают, что животные, которые никакого опыта восприятия музыки в жизни не имели, различают гармонию и диссонанс аналогично человеку [11], следовательно, предпосылками такой классификации музыкальных созвучий являются, по всей видимости, фундаментальные особенности функционирования нейросистем. Иначе говоря, эффекты восприятия музыки напрямую связаны с эффектами распространения сигналов в

нейронных системах. Для проверки данного положения необходимо построить доступную для теоретического изучения физиологически обоснованную математическую модель зашумлённого нейронного ансамбля слухового анализатора, ограничив множество входных воздействий парами, тройками и другими более сложными суперпозициями синусоидальных сигналов с рациональными отношениями частот. *На сегодняшний день, в литературе отсутствует систематическое исследование эффектов восприятия созвучий синусоидальных колебаний многокаскадными зашумлёнными нейросистемами, хотя сами такие системы и эффекты восприятия активно изучаются независимо друг от друга. В настоящей диссертационной работе эти подходы были объединены и исследованы с помощью математической модели.* Помимо сказанного выше, в теории музыки накоплен обширный эмпирический материал и разнообразные его трактовки, выявляющие множество нетривиальных эффектов, связанных с воздействием суперпозиций синусоидальных колебаний на зашумлённые нейронные ансамбли [12–14]. Эта база данных позволяет весьма эффективно оценивать пригодность исследуемых моделей и тестировать соответствие получаемых аналитических и численных результатов реальности.

Исходя из приведённого обзора актуальных вопросов распространения сигналов в зашумлённых нелинейных средах на примере нейроподобных систем, была сформулирована цель настоящей диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка адекватной модели входного нейронного ансамбля слухового анализатора, включая набор входных воздействий, и детальный анализ закономерностей преобразования этих воздействий полученной нелинейной зашумлённой системой с использованием вероятностного, спектрального и информационного подходов.

Методы исследования и достоверность научных результатов. Достоверность сформулированных в диссертации результатов подтверждается использованием хорошо известных методов теории вероятностей и теории случайных процессов, сравнением результатов аналитических расчётов с результатами численного моделирования, а также хорошим качественным соответствием данным нейрофизиологических экспериментов.

Научная новизна. Впервые с помощью детального вероятностного анализа построена скрытая марковская цепь, описывающая немарковский им-

пульсный сигнал на выходе порогового зашумлённого элемента, находящегося под действием случайных немарковских импульсных последовательностей. На основе найденных закономерностей поведения этой цепи впервые получены аналитические выражения для спектральной плотности мощности и параметра регулярности выходного импульсного сигнала системы. Приложение развитой теории к модели слухового анализатора позволило предложить новую гипотезу для объяснения эффектов восприятия музыкальных созвучий млекопитающими.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанные методы вероятностного, спектрального и информационного анализа механизмов генерации немарковских импульсных последовательностей пригодны для изучения различных пороговых зашумлённых радиофизических систем. Полученные результаты имеют непосредственное приложение к теории восприятия музыкальных созвучий.

На защиту выносятся:

1. Метод вероятностного анализа механизма генерации импульсов зашумлённым пороговым элементом под действием суперпозиции случайных немарковских импульсных последовательностей, позволяющий сконструировать скрытую марковскую цепь, описывающую процесс генерации.
2. Зависимость регулярности случайного немарковского импульсного сигнала на выходе двухкаскадной системы пороговых элементов от отношения частот пары входных гармонических колебаний.
3. Аналитико-численный метод оценки спектральной плотности мощности выходного немарковского импульсного сигнала двухкаскадной системы пороговых элементов, находящейся под действием пары гармонических колебаний с соизмеримыми частотами.
4. Подтверждённая в рамках модели непосредственная связь ощущения гармонии при восприятии музыкальных созвучий с регулярностью импульсных сигналов в нервной системе, возбуждаемых действием этих созвучий.

Апробация результатов. Основные результаты работы были представлены на международной конференции «Stochastic Resonance 2008» (Перуджа, Италия, 2008), трёх радиофизических конференциях: «Научная конференция по радиофизике» (Нижний Новгород, 2008, 2009, 2010) и трёх региональных конференциях: «Нижегородская сессия молодых ученых (естественнонаучные дисциплины)» (Нижний Новгород, 2008, 2009, 2010). Материалы диссертации обсуждались на научных семинарах кафедры математики радиофизического факультета ННГУ, а также на заседаниях межуниверситетской аспирантской комиссии на кафедре физики и физических технологий университета г. Палермо (Италия).

Публикации. Материалы диссертации представлены в 12 печатных работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах [A1–A5], 1 статья в сборнике «Актуальные проблемы статистической радиофизики (малаховский сборник)» [A6] и 6 тезисов докладов [A7–A12].

Личный вклад автора. В совместных работах автор принимал непосредственное участие в выборе направлений исследований и постановке основных задач. Все представленные результаты теоретического исследования и численного моделирования получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, списка публикаций автора и двух приложений. Общий объём диссертации составляет 106 стр., включая 90 стр. основного текста, два приложения, список литературы из 128 наименований, 33 рисунка и 1 таблицу.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований. Показана фундаментальная и прикладная значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В обзорной **первой главе** кратко изложены сведения, необходимые для обоснованного введения исследуемой математической модели нейронного ансамбля слухового анализатора. В **разделе 1.1** описаны особенности строения и поведения живых нервных клеток (нейронов) и их ансамблей. Приведена

физиологически обоснованная математическая модель нейрона Ходжкина-Хаксли [15] и обоснована необходимость введения шума в модель нейрона для учёта влияния естественной среды нервной клетки. В **разделе 1.2** говорится о возможной конструктивной роли шума [16] в нейронных ансамблях, которая усиливает научный интерес к этим сложным зашумлённым нелинейным системам. Приведён обзор основных методов и анализируемых характеристик, применяемых в подобных исследованиях. Описывается модель нейрона «Пороговый интегратор с утечкой», которая является базовым элементом изучаемой в диссертационной работе системы, и обосновывается введение аддитивного белого гауссового шума в базовый элемент.

Раздел 1.3 посвящён описанию механической и входной нейронной частей слухового анализатора, имеющего схожее строение у млекопитающих, птиц и других представителей фауны. Согласно исследованиям [17], в улитке среднего уха звук раскладывается на механические синусоидальные колебания, каждое из которых действует затем на определённую группу нейронов — так называемых *сенсоров*. Сенсоры преобразуют механические воздействия в последовательности коротких мощных электрических импульсов действия (*спайков*), которые отправляются по возбудимым нервным волокнам в мозг, на входы промежуточных нейронов (*интернейронов*). Рассмотрены нетривиальные эффекты восприятия созвучий, состоящих всего из двух гармонических колебаний с разными частотами, что обосновывает изучение в работе модели слухового анализатора под действием двух синусоидальных сигналов.

Во **второй главе** вводится и исследуется нелинейная стохастическая модель нейронного ансамбля слухового анализатора. **Раздел 2.1** посвящён математическому описанию исследуемой модели и общим характеристикам её поведения. Так как изучается поведение нейронной части слухового анализатора под действием двух гармонических колебаний с разными частотами, моделируемая система (Рис. 1) имеет на входе два сенсора, спайковые последовательности которых поступают на вход одного интернейрона. Данная

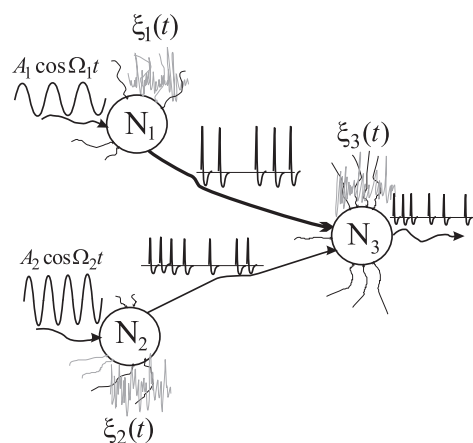


Рис. 1. Двухкаскадная нейронно-подобная система.

двухкаскадная нейроподобная система описывается тремя стохастическими дифференциальными уравнениями ланжевеновского типа:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = -\mu_1 v_1 + A_1 \cos \Omega_1 t + \sqrt{D_1} \xi_1(t), \\ \dot{v}_2 = -\mu_2 v_2 + A_2 \cos \Omega_2 t + \sqrt{D_2} \xi_2(t), \\ \dot{v} = -\mu v + k_1 s_1(t) + k_2 s_2(t) + \sqrt{D} \xi(t), \end{cases} \quad (1)$$

где: $v_1(t), v_2(t), v(t)$ — мембранные потенциалы сенсоров и интернейрона соответственно; μ_1, μ_2, μ — параметры релаксации нейронов (здесь и далее понятие *нейрон* используется, вообще говоря, для нейроподобного элемента, т.е. модели нервной клетки); $\sqrt{D_1} \xi_1(t), \sqrt{D_2} \xi_2(t), \sqrt{D} \xi(t)$ — статистически независимые белые гауссовы шумы с интенсивностями, соответственно: D_1, D_2 и D ; A_1, A_2 и Ω_1, Ω_2 — амплитуды и частоты действующих на сенсоры гармонических сигналов; k_1, k_2 — коэффициенты связи сенсоров с интернейроном; $s_1(t), s_2(t)$ — спайковые последовательности сенсоров на входе интернейрона. Действие сенсора на интернейрон моделируется суперпозицией дельта-импульсов, т.е. подразумеваются возбуждимые связи, задержки в которых в расчёт не берутся: $s_i(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \delta(t - t_{ij})$, где: $i = 1, 2, t_{ij}$ — случайные моменты генерации спайков i -м сенсором. Несмотря на линейность уравнений системы (1), следует подчеркнуть, что все три её элемента нелинейны, т.к. мембранные потенциалы v_1, v_2 и v сбрасываются на заданные уровни v_1^0, v_2^0, v^0 , соответственно, при достижении порога генерации $v_{th} = 1$.

Плотности распределения межспайковых интервалов процессов $s_{1,2}(t)$ не являются пуассоновскими, следовательно, генерируемый интернейроном импульсный сигнал является немарковским, что делает неприменимым для статистического анализа математический аппарат уравнений Колмогорова-Феллера [18]. Поэтому в **разделе 2.2** проведён детальный анализ процесса генерации спайков интернейроном на основе общей теории вероятностей и теории случайных процессов. Этот анализ позволил сконструировать скрытую марковскую цепь, описывающую выходную спайковую последовательность. Для каждого из состояний этой цепи получены аналитические формулы для вероятностных распределений времени первого достижения порога генерации мембранным потенциалом интернейрона. Усреднение указанных распределений по состояниям скрытой марковской цепи даёт распределение межспайковых интервалов (РМСИ) выходного сигнала (сплошная линия на

Рис. 2), достаточно точно совпадающее с распределением, полученным прямым численным моделированием системы (1) (пунктирная линия на Рис. 2).

В разделе 2.3 рассматриваются обобщения системы (1): при числе входных сенсоров более двух; более высоких частотах входных сигналов; большем числе каскадов; и при использовании другого базового элемента, например, модели нейрона ФитцХью-Нагумо [19]. Показано, что развитая в разделе 2.2 теория остаётся работоспособной, требуя лишь определённых модификаций аналитических выражений.

В третьей главе изучаются механизмы искажения сигналов рассматриваемой системой. В разделе 3.1 приводятся РМСИ на выходе системы (1), полученные в численном эксперименте при различных рациональных отношениях частот входных гармонических сигналов. Если отношение частот выражено малыми целыми числами, что соответствует гармоничным созвучиям в музыке, то РМСИ выходного сигнала состоит из чётко выраженных пиков (Рис. 2а,б). В противном случае, при больших числах отношения, РМСИ имеют размытый вид (Рис. 2с), характерный для шумоподобных сигналов, тогда как интенсивности источников шума в системе при этом не меняются. На основе анализа скрытой марковской цепи, полученной во второй главе, в разделе 3.1 объясняется механизм размытия РМСИ выходного сигнала с ростом чисел отношения частот входных колебаний и даются определённые количественные характеристики этого эффекта.

В разделе 3.2, с использованием матрицы переходов скрытой марковской цепи, найдены значения удельной информационной энтропии H выходного сигнала интернейрона при различных отношениях m/n частот входных

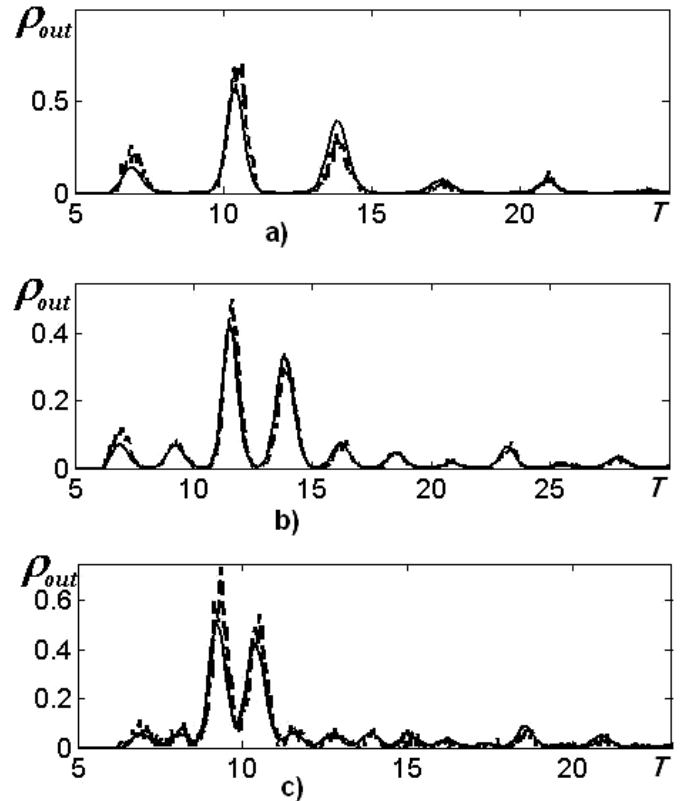


Рис. 2.

колебаний и введён параметр регулярности сигнала для набора отношений m/n : $R(m/n) = \max_{m,n} H(m/n) - H(m/n)$, далее называемый для краткости *регулярностью*. Установлено снижение регулярности выходного сигнала с ростом числителя и знаменателя отношения m/n (Рис. 3). График на Рис. 3

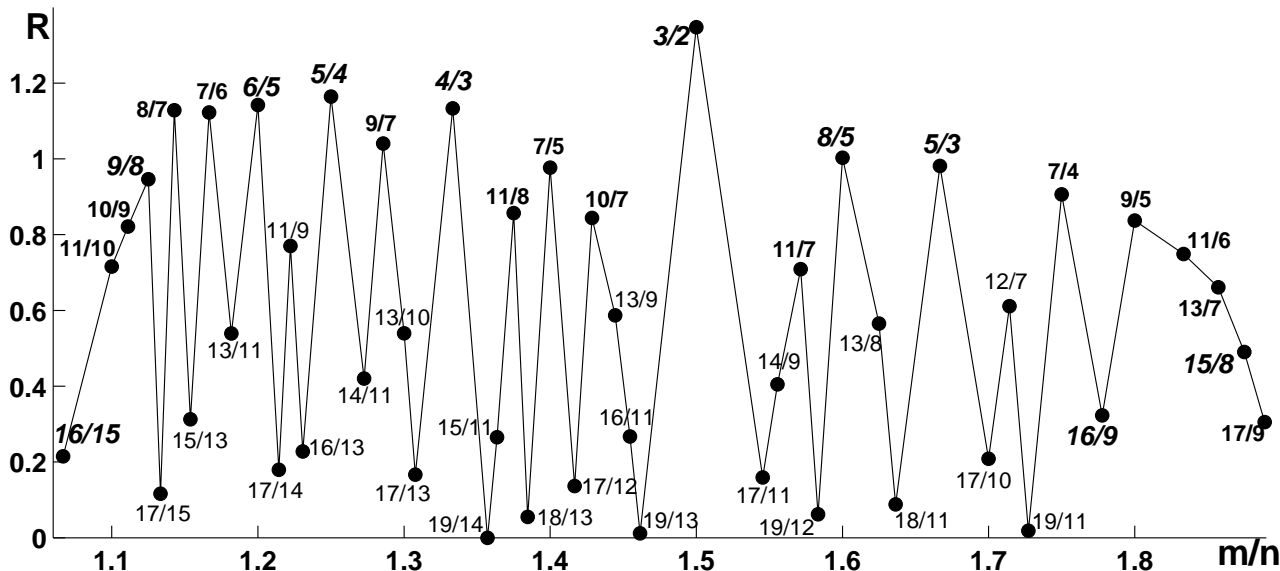


Рис. 3. Зависимость регулярности выходного сигнала системы (1) от отношения m/n частот входных колебаний.

иллюстрирует ясные количественные характеристики зависимости регулярности от отношения частот, которые непротиворечиво дополняют известные из теории восприятия звука данные [12, 20].

Результаты, изложенные в третьей главе, позволяют предположить, что ощущение гармонии при восприятии созвучий гармонических колебаний объясняется устойчивыми к шумам среды регулярными импульсными сигналами, возбуждаемыми под действием этих созвучий в нервной системе. И наоборот, ощущение диссонанса возникает из-за нерегулярных, шумоподобных импульсных сигналов в нейроансамблях мозга.

В **четвёртой** главе проводится спектральный анализ выходного импульсного сигнала системы (1). В **разделе 4.1**, на основе известных вероятностных характеристик скрытой марковской цепи, выведена формула для спектральной плотности мощности (СПМ) немарковского импульсного сигнала. В **разделе 4.2** анализируются зависимости СПМ, построенные для системы (1) на основе выведенного соотношения. Показано, что с ростом чисел отношения частот входных гармонических колебаний, в результате взаимо-

действия сигналов и шумов на нелинейностях системы (1), в СПМ появляются новые компоненты, приводящие к размытию чётких пиков, соответствующих гармоникам входных синусоидальных сигналов (Рис. 4а,б). Однако, в

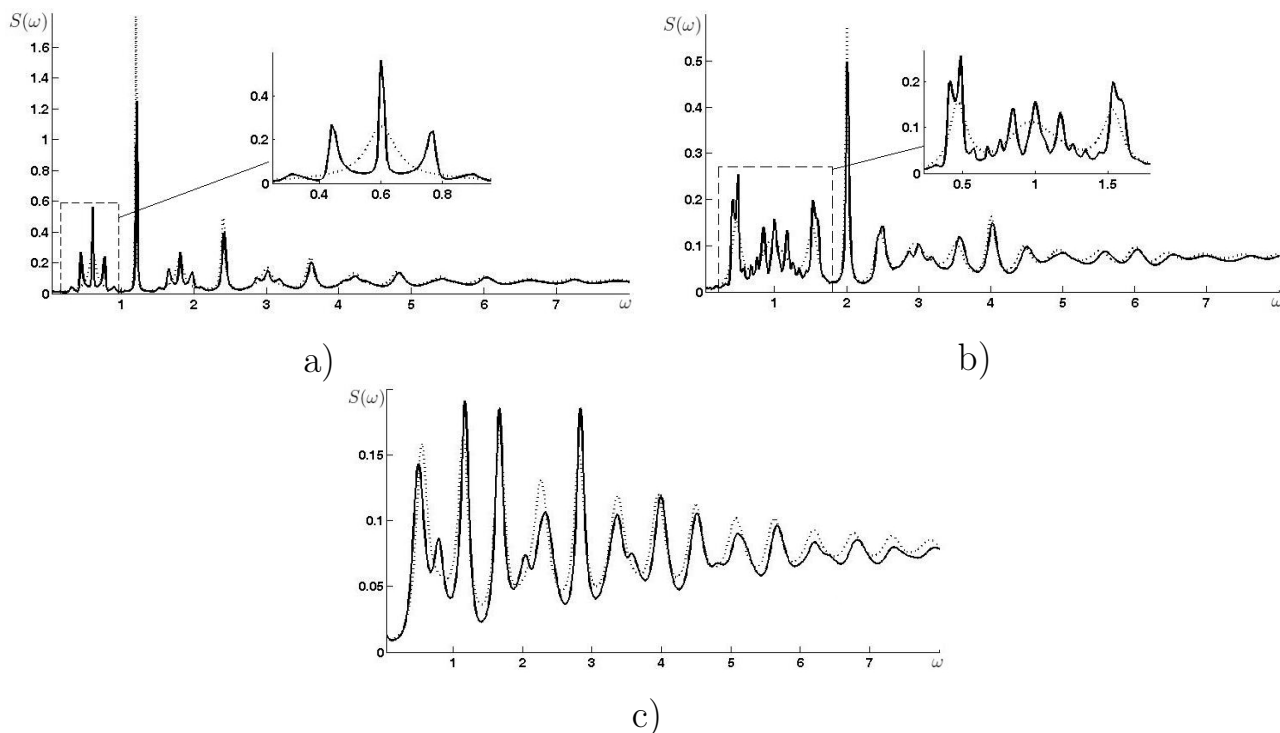


Рис. 4. Спектральная плотность мощности выходного сигнала. Отношение частот входных колебаний: а) $3/2$, б) $5/4$, в) $45/32$. Точечная линия — грубая оценка, полученная при искусственном предположении статистической независимости межспайковых интервалов в выходном сигнале системы (1).

результате дальнейшего роста чисел отношения частот входных колебаний, в СПМ чётко проявляются либо пики гармоник средней частоты входных колебаний $(\Omega_1 + \Omega_2)/2$, либо пики, присутствующие в СПМ при других отношениях частот. Так, например, отношение $45/32$ находится на вещественной оси между отношениями $4/3$ и $3/2$, и в зависимости, представленной на Рис. 4с, проявляются спектральные компоненты, соответствующие пикам СПМ при отношениях частот $4/3$ и $3/2$. Сделан вывод о том, что при больших числах отношения частот m/n СПМ не даёт удовлетворительного описания процесса, и поэтому необходим расчёт более сложных спектральных характеристик: спектрограмм, вейвлет-преобразований и/или полиспектров.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты диссертационной работы

1. На основе методов теории вероятностей и теории случайных процессов исследован механизм генерации немарковской последовательности импульсов пороговым интегратором с утечкой, находящимся под воздействием белого гауссова шума и суперпозиции немарковских импульсных сигналов. В результате, получены аналитические выражения для вероятностных характеристик выходного сигнала и, в том числе, матрицы переходов скрытой марковской цепи, описывающей процесс генерации. Показана возможность построения аналогичной скрытой марковской цепи для описания многокаскадных систем, базовым звеном которых может быть не только пороговый интегратор с утечкой, но и более сложные зашумлённые нейроподобные элементы.
2. Для двухкаскадной нейроподобной системы зашумлённых пороговых интеграторов с утечкой, находящейся под воздействием двух синусоидальных сигналов с рациональным отношением частот, численно получены вероятностные распределения межспайковых интервалов выходного сигнала, состоящие из чётко выраженных пиков в случае малых чисел отношения частот (гармоничные созвучия в музыке) и оказывающиеся размытыми при больших числах отношения частот (диссонансные созвучия). На основе характеристик скрытой марковской цепи объяснены механизмы нелинейного искажения входных синусоидальных сигналов системой.
3. По найденной матрице переходов скрытой марковской цепи, с помощью известной формулы для информационной энтропии марковского процесса построена зависимость параметра регулярности выходного импульсного сигнала двухкаскадной нейроподобной системы от отношения частот входных гармонических колебаний. Эта зависимость не противоречит теории о восприятии музыкальных созвучий млекопитающими и дополняет её новыми количественными характеристиками. Она также подтверждает обнаруженную в рамках исследуемой модели связь между ощущением гармонии при восприятии простых созвучий и генерацией регулярных импульсных сигналов в нервной системе под воздействием этих созвучий.

4. Выведено аналитическое выражение для спектральной плотности мощности немарковского импульсного процесса, описываемого скрытой марковской цепью. На основе выражения проведён спектральный анализ выходного сигнала двухкаскадной нейроподобной системы для различных отношений частот входных синусоидальных колебаний, выводы которого, в целом, совпадают с выводами информационного анализа и анализа вероятностных характеристик.

Работа была выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (госконтракт № П457 от 31.07.2009 г.) и РФФИ (грант 08-02-01259а).

Список публикаций по теме диссертации

- A1. Ushakov Y. V., Dubkov A. A., Spagnolo B. Spike train statistics for consonant and dissonant musical accords in a simple auditory sensory model // *Phys. Rev. E*. 2010. Vol. 81. Pp. 041911–1–13.
- A2. Ушаков Ю. В. Статистика выходной спайковой последовательности нейронной модели слухового анализатора // *Вестник ННГУ*. 2010. Т. 4. С. 67–72.
- A3. Ушаков Ю. В. Нелинейное искажение простых сигналов в зашумлённой нейроподобной системе // *Вестник ННГУ*. 2010. Т. 5. В печати.
- A4. Ушаков Ю. В., Дубков А. А. Спектральная плотность мощности условного марковского импульсного процесса // *Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2010. Т. 5. С. 38–42.
- A5. Ушаков Ю. В., Дубков А. А. Зависимость регулярности выходного импульсного сигнала нейронной модели от отношения частот входных колебаний // *Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2010. Т. 6. В печати.
- A6. Ушаков Ю. В. Модель нейрона “пороговый интегратор с утечкой” в исследованиях прохождения сигналов через нелинейные зашумлённые

среды // Актуальные проблемы статистической радиофизики. 2009. Т. 8. С. 68–87.

- A7. Ушаков Ю. В., Дубков А. А. Исследование распределения межспайковых интервалов в модели связанных нейронов под действием шума // Труды 13-й Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины). Нижний Новгород: Гладкова О.В., 2008. С. 84.
- A8. Дубков А. А., Ушаков Ю. В. Конструктивная роль шума в модели связанных нейронов с гармоническим сигналом на входе // Труды 12-й научной конференции по радиофизике, посвященной 90-й годовщине со дня рождения М.М. Кобрина / Под ред. А. Якимова, С. Грача. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2008. С. 249–250.
- A9. Ушаков Ю. В., Дубков А. А. Статистика межспайковых интервалов для гармонических и диссонансных созвучий на входе нейронной модели слуховой системы // Труды 14-й Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины). Нижний Новгород: Гладкова О.В., 2009. С. 18–19.
- A10. Ушаков Ю. В., Дубков А. А. Расчет статистики межспайковых интервалов нейронной модели под действием суперпозиции известных спайковых последовательностей // Труды 13-й научной конференции по радиофизике, посвященной 85-летию со дня рождения М.А. Миллера / Под ред. С. Грача, А. Якимова. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2009. С. 209–210.
- A11. Ушаков Ю. В., Дубков А. А. Зависимость спектральной плотности мощности импульсного сигнала нейронной системы от параметров входного воздействия // Труды 15-й Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины). Нижний Новгород: 2010. В печати.
- A12. Ушаков Ю. В., Дубков А. А. Регулярность условного марковского импульсного процесса // Труды 14-й научной конференции по радиофизике, посвященной 80-й годовщине со дня рождения Ю.Н. Бабанова. Нижний Новгород: 2010. В печати.

Цитированная в автореферате литература

1. Lindner B., García-Ojalvo J., Neiman A., Schimansky-Geier L. Effects of noise in excitable systems // *Phys. Rep.* 2004. Vol. 392. Pp. 321–424.
2. Benzi R., Sutera A., Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance // *J. Phys. A.* 1981. Vol. 14. Pp. L453–L457.
3. Plesser H. E., Tanaka S. Stochastic resonance in a model neuron with reset // *Phys. Lett. A.* 1997. Vol. 225. Pp. 228–234.
4. Bulsara A. R., Zador A. Threshold detection of wideband signals: a noise-induced maximum in the mutual information // *Phys. Rev. E.* 1996. Vol. 54, no. 3. Pp. R2185–R2188.
5. Pankratova E. V., Polovinkin A. V., Spagnolo B. Suppression of noise in FitzHugh–Nagumo model driven by a strong periodic signal // *Phys. Lett. A.* 2005. Vol. 344. Pp. 43–50.
6. Pankratova E. V., Polovinkin A. V., Mosekilde E. Resonant activation in a stochastic Hodgkin-Huxley model: interplay between noise and suprathreshold driving effects // *Eur. Phys. J. B.* 2005. Vol. 45, no. 3. Pp. 391–397.
7. Chialvo D. R., Calvo O., Gonzalez D. L. et al. Subharmonic stochastic synchronization and resonance in neuronal systems // *Phys. Rev. E.* 2002. Vol. 65. Pp. 050902(R)–1–4.
8. Balenzuela P., García-Ojalvo J. Neural mechanism for binaural pitch perception via ghost stochastic resonance // *Chaos.* 2005. Vol. 15. Pp. 023903–1–8.
9. Calvo O., Chialvo D. R. Ghost stochastic resonance in an electronic circuit // *Int. J. of Bifurcation and Chaos.* 2006. Vol. 16, no. 3. Pp. 731–735.
10. Lopera A., Buldú J. M., Torrent M. C. et al. Ghost stochastic resonance with distributed inputs in pulse-coupled electronic neurons // *Phys. Rev. E.* 2006. Vol. 73. Pp. 021101–1–6.

11. Fishman Y. I., Volkov I. O., Noh M. D. et al. Consonance and dissonance of musical chords: neural correlates in auditory cortex of monkeys and humans // J. Neurophysiol. 2001. Vol. 86. Pp. 2761–2788.
12. Plomp R., Levelt W. J. M. Tonal consonance and critical bandwidth // J. Acoust. Soc. Am. 1965. Vol. 38. Pp. 548–560.
13. Schouten J. F., Ritsma R. J., Cardozo B. L. Pitch of the residue // J. Acoust. Soc. Am. 1962. Vol. 34. Pp. 1418–1424.
14. Benson D. J. Music: a mathematical offering. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 426 p.
15. Hodgkin A. L., Huxley A. F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // J. Physiol. 1952. Vol. 117. Pp. 500–544.
16. Gammaitoni L., Hänggi P., Jung P., Marchesoni F. Stochastic resonance // Rev. Mod. Phys. 1998. Vol. 70. Pp. 223–287.
17. Скучик Е. Основы акустики, Под ред. Ю. М. Сухаревского. Москва: Ин. лит., 1959. Т. 2. 566 с.
18. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские цепи. Москва: Сов. радио, 1977.
19. Некоркин В. И., Артюхин Д. В. Регулярные и хаотические колебания в системе двух взаимосвязанных, динамически различных элементов ФитцХью-Нагумо // Изв. вузов. ПНД. 2001. Т. 9, № 6. С. 45–68.
20. Cariani P. Temporal codes, timing nets, and music perception // J. New Music Res. 2001. Vol. 30, no. 2. Pp. 107–135.

Оглавление диссертации

Введение

Глава 1. Обзор нейронных моделей и методов их исследования при шумовом воздействии

- 1.1. Модели нейронов
- 1.2. Исследование моделей нейронов с шумом
- 1.3. Слуховой анализатор млекопитающих
- 1.4. Выводы к первой главе

Глава 2. Вероятностный анализ модели слухового анализатора

- 2.1. Модель слухового анализатора
- 2.2. Вероятностный анализ
- 2.3. Обобщения модели
- 2.4. Выводы ко второй главе

Глава 3. Механизмы взаимодействия сигналов и шумов на нелинейностях системы

- 3.1. Преобразование плотностей вероятности межспайковых интервалов
- 3.2. Зависимость регулярности выходного сигнала системы от отношения частот входных колебаний
- 3.3. Выводы к третьей главе

Глава 4. Спектральный анализ выходного импульсного сигнала системы

- 4.1. Вычисление спектральной плотности мощности условного марковского импульсного случайного процесса
- 4.2. Свойства спектральной плотности мощности выходной спайковой последовательности
- 4.3. Выводы к четвёртой главе

Заключение

Литература

Список публикаций автора

Приложение А. Алгоритмы численного счёта

- А.1. Моделирование шума
- А.2. Моделирование влияния дельта-импульсов

Приложение Б. Минимальное расстояние между пиками распределения времени первого достижения интернейрона