

На правах рукописи

ИВАНЧЕНКО Михаил Васильевич

СИНХРОНИЗАЦИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР В СЛОЖНЫХ
ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ АНСАМБЛЯХ (КОЛЕБАНИЯ НА НЕСКОЛЬКИХ
ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ, НЕРЕГУЛЯРНАЯ ТОПОЛОГИЯ
СВЯЗИ)

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2007

Работа выполнена в Нижегородском государственном университете им.
Н.И. Лобачевского

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор В.Д. Шалфеев

Официальные оппоненты:

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,
профессор Д.И. Трубецков
доктор физико-математических наук, профессор В.Н. Белых

Ведущая организация:

Институт радиотехники и электроники РАН

Защита состоится «16» мая 2007 г. в 13 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском
государственном университете им. Н.И. Лобачевского (603950, Н.
Новгород, ГСП-20, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд.420)

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета.

Автореферат разослан «06» апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы:

Исследование процессов синхронизации и связанного с ними структурообразования в ансамблях регулярных и хаотических осцилляторов на протяжении многих лет является актуальной задачей радиофизики. Теория синхронизации регулярных колебаний была в основном построена в 30-х -- 60-х годах XX века и исчерпывающе описывала вынужденную синхронизацию автогенератора внешним периодическим сигналом и взаимную синхронизацию двух автоколебательных систем. Эта теория была положена в основу решения многих прикладных задач радиофизики, в частности, задач когерентного приема в системах связи, построения радиолокационных и навигационных систем, исследования динамики ансамблей сверхпроводящих джозефсоновских контактов и т.д. Тем не менее, в последние два десятилетия наблюдается крайне высокая активность в исследованиях синхронизации и связанных с ней динамических процессов, в частности, образования пространственных структур. Это продиктовано как интересом к процессам синхронизации сложных и хаотических колебаний, так и появлением целого ряда задач, требующих анализа коллективной динамики больших ансамблей со сложной топологией связи.

Во-первых, большое число природных и технических физических систем может рассматриваться как класс распределенных, пространственно дискретных или непрерывных нелинейных активных колебательных систем, обладающих некоторым спектром колебательных мод. Примерами служат системы с турбулентностью, ансамбли многомодовых лазеров, джозефсоновских контактов, микро- и наномеханических осцилляторов. Одним из распространенных коллективных эффектов в таких системах является эффект синхронизации большого числа взаимодействующих, зачастую хаотических, нелинейных мод.

Во-вторых, явление динамического хаоса - сложного, квазислучайного поведения полностью детерминированной системы, по-видимому, может быть использовано для разработки новых подходов в задаче передачи информации. Преимущества хаотического сигнала над регулярным заключаются в его широкополосности (и, как следствие, большей помехоустойчивости и информационной емкости). Синхронизация идентичных или слабо неидентичных хаотических колебаний позволяет реализовать когерентный прием в схемах для

передачи с помощью динамического хаоса, управлять распределением фаз в радиолокационных системах, декодировать сообщения, зашифрованные с помощью хаотического сигнала.

Наконец, идеи и методы радиофизики сейчас находят применение в анализе способов передачи, хранения и обработки информации биологическими нейронными сетями. Здесь одним из ключевых вопросов является механизм координации работы отдельных нейронов. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования отводят эту роль процессам синхронизации. Поскольку значительная часть нейронов может генерировать хаотические колебания, наиболее адекватной постановкой задачи, сформулированной в терминах теории колебаний, здесь является изучение процессов хаотической синхронизации в больших ансамблях хаотических автоколебательных систем со сложной, нерегулярной топологией связи.

Следует отметить, что под синхронизацией регулярных колебаний всегда понималось совпадение их частот в результате взаимодействия. Для хаотических колебаний существует сразу несколько подходов к определению синхронизации, основанных на сравнении их различных характеристик. Мы будем рассматривать исключительно фазовую хаотическую синхронизацию, критерием которой является совпадение средних частот колебаний, как наиболее близкую к синхронизации регулярных колебаний.

Несмотря на обширную литературу, посвященную исследованию фазовой хаотической синхронизации и структур синхронизации (В.С. Анищенко, В.В. Астахов, Б.П. Безручко, В.Н. Белых, А.С. Дмитриев, А.А. Короновский, А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, А.Ю. Лоскутов, В.В. Матросов, В.И. Некоркин, В.Б. Казанцев, Г.В. Осипов, А.С. Пиковский, Д.Е. Постнов, М.И. Рабинович, М. Розенблюм, Н.Ф. Рульков Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, В.Г. Яхно, Н. Abarbanel, S. Boccaletti, V.G. Ermentrout, E.M. Izhekevich, M. Hasler, J. Kurths, Y. Kuramoto, U. Parlitz, L. Pesora, S. Strogatz), большинство работ ограничивается случаем, когда автоколебания во взаимодействующих системах слабо хаотичны, имеют ярко выраженный максимум в спектре мощности, соответствующий некоторой средней частоте колебаний. Синхронизация таких систем имеет много общего с синхронизацией периодических осцилляторов. В ряде работ (А.А. Короновский, А.Е. Храмов) затрагивается вопрос синхронизации систем с более развитым хаосом, спектр мощности которых имеет несколько ярко выраженных максимумов (соответствующих различным характерным временным масштабам колебаний). Однако сколько-нибудь полная теория синхронизации таких

систем в настоящее время отсутствует. Коллективная динамика ансамблей подобных осцилляторов, в том числе, характеризующихся сложной, нерегулярной топологией связи, является на настоящий момент одной из наиболее актуальных задач нелинейной динамики и радиофизики. Она имеет принципиальное значение для понимания основных закономерностей синхронной динамики распределенных активных систем с колебаниями на нескольких временных масштабах, таких как антенные решетки, цепочки связанных лазеров, модели турбулентных сред, нейронные ансамбли. Именно эти вопросы определяют актуальность темы диссертационной работы.

Цель диссертационной работы состоит в развитии теории фазовой хаотической синхронизации и образования структур в сложных ансамблях осцилляторов с хаотическими колебаниями на нескольких временных масштабах и нерегулярной топологией связей, и ее применении для исследования динамики связанных лазеров в режиме генерации берстовых импульсов, механизмов генерации и синхронизации берстов нейронными ансамблями, а также разработки метода динамического анализа структуры сложных сетей.

Методы исследования и достоверность научных результатов.

Представленные в работе результаты получены путем численного моделирования, а также с использованием качественных методов теории колебаний. Их достоверность и общность подтверждены воспроизводимостью результатов численного моделирования; воспроизводимостью результатов на базе различных математических моделей (ансамбли отображений, ансамбли обыкновенных дифференциальных уравнений); соответствием экспериментальным и численным результатам, известным из литературы. Эффективность предложенного метода анализа структуры сетей показана путем сравнения с характеристиками известных методов.

Научная новизна.

- Построена теория фазовой хаотической синхронизации колебаний на нескольких временных масштабах, в основу которой положены новые способы определения фазы и средней частоты. Исследованы основные закономерности процессов синхронизации и десинхронизации подобных систем (осцилляторы Ресслера в режиме аттрактора "воронка", отображения и осцилляторы Лоренца с хаотической

переключаемостью, лазеры в режиме генерации сложных хаотических импульсов).

- Обнаружен и исследован механизм генерации пакетов электрических импульсов (спайков) в нейронных ансамблях (как колебаний на новом временном масштабе) за счет неустойчивости режима синхронизации одиночных спайков, возникающей при увеличении силы связи.
- Для взаимодействующих малых ансамблей нейронных осцилляторов в режиме генерации спайковых пакетов (за счет конкуренции) впервые продемонстрировано существование областей взаимной синхронизации на высоких субгармониках (как синхронизации между колебаниями на различных временных масштабах), сравнимых по ширине с областями на основной гармонике и низких субгармониках.
- Впервые исследованы закономерности формирования структур синхронизации многомасштабных колебаний нейронных осцилляторов (в виде спайковых пакетов - берстов) при наличии конкуренции между ними.
- Впервые предложен метод анализа структуры сложных сетей с использованием явлений десинхронизации и кластерной синхронизации в ансамблях фазовых осцилляторов.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты могут найти применение при решении задач, связанных с исследованием коллективной динамики сетей сложных хаотических осцилляторов с колебаниями на нескольких ярко выраженных временных масштабах. Обнаруженный механизм генерации берстов в нейронных ансамблях, как было показано, наблюдается при различных типах моделируемой синаптической связи, различных топологиях нейронного ансамбля, а также и при использовании реалистичных моделей типа Ходжкина-Хаксли в моделировании, в связи с чем его присутствие и экспериментальное обнаружение в биологических экспериментах представляется вполне вероятным. Кроме того, ожидается, что подобный механизм может наблюдаться и в других системах с нейроподобной динамикой, например в связанных лазерах в режиме генерации одиночных импульсов. Результаты исследования взаимной синхронизации на субгармониках в малых нейронных ансамблях с берстовой динамикой типа конкуренция без победителя, а также формирования структур синхронизации берстов в нейронных ансамблях с конкуренцией могут найти применение как в задачах

изучения процессов обработки и хранения информации нейронными ансамблями, так и для разработки алгоритмов для искусственных интеллектуальных систем, конструируемых на базе нейробиологических принципов. Динамический метод анализа структуры сложных сетей имеет вполне конкурентноспособные характеристики среди известных методов и представляется перспективным для анализа больших метаболических, протеиновых, социальных и физических сетей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В ансамблях достаточно широкого класса сложных хаотических осцилляторов с колебаниями на нескольких временных масштабах могут наблюдаться явления фазовой хаотической синхронизации и десинхронизации. Для анализа этих явлений могут быть введены фаза и средняя частота колебаний либо методом объединения временных масштабов (обнаруженным способом преобразования координат - переходом в пространство скоростей), либо методом разделения временных масштабов, при котором колебания на различных масштабах рассматриваются как независимые и синхронизация имеет место на одном из них.
2. В ансамблях нейронных осцилляторов, генерирующих одиночные электрические импульсы (спайки) реализуется механизм генерации колебаний на новом временном масштабе в виде спайковых пакетов (берстов). Этот механизм заключается в генерации быстрых повторных спайков и в потере устойчивости режима фазовой хаотической синхронизации одиночных спайков при превышении некоторого порога по силе связи между нейронами.
3. Малые ансамбли нейронов, генерирующие пакеты электрических импульсов (берсты) за счет конкуренции, могут демонстрировать фазовую хаотическую синхронизацию между различными временными масштабами. Полоса взаимной синхронизации ансамблей на высоких субгармониках, сравнима по ширине с полосой взаимной синхронизации на основной частоте либо на низких субгармониках. Три таких ансамбля, объединенных в цепочку, могут быть взаимно синхронизованы на субгармониках так, что соотношение между частотами крайних элементов может быть существенно увеличено без уменьшения полосы синхронизации.
4. Для решения одной из задач анализа структуры сложных сетей - выделения модулей (тесно связанных внутри и менее тесно -

между собой подсетей) может быть применен динамический метод, основанный на отождествлении узлов сети с осцилляторами, а образующихся при изменении управляющего параметра структур кластерной фазовой синхронизации - с искомыми топологическими структурами - модулями. Предложенный метод является эффективным, не уступающим в точности, а иногда и превосходящим известные не динамические методы и потенциально превышающим в скорости в случае анализа сетей большого размера, к которым относятся многие сети из приложений - метаболические, протеиновые, социальные и др.

Личный вклад автора. В совместных статьях [2,6] роль автора в выборе направлений исследований, постановке основных задач, получении и обсуждении результатов была ведущей; научные результаты в статьях [1,3,4,5,8] получены на паритетных началах с соавторами. Компьютерное моделирование исследуемых систем выполнено лично автором.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных научных конференциях "Nonlinear Dynamics of Electronic Systems" (Switzerland, 2003), "Physics and Control" (Санкт-Петербург, 2003), "Experimental Chaos - 8" (Florence, Italy, 2004), "Nonlinear Dynamics of Electronic Systems" (Potsdam, Germany, 2005) "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics" (Нижний Новгород, 2005), "Physics and Control" (Санкт-Петербург, 2005) а также на конференциях молодых ученых "Нелинейные волновые процессы" (Нижний Новгород, 2004, 2006). Материалы диссертации обсуждались на научных семинарах кафедры теории колебаний ННГУ, ИПФ РАН и Института Физики Университета Потсдама.

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, включая 7 статей в ведущих рецензируемых физических журналах, 5 статей в сборниках трудов научных конференций, 2 тезиса докладов, 1 препринт в электронном архиве.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы. Диссертация содержит 154 страницы, включая 92 рисунка и список литературы из 127 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов.

В **первой главе** предложен подход к решению задачи о фазовой хаотической синхронизации колебаний на нескольких ярко выраженных временных масштабах, основанный на введении фазы и средней частоты.

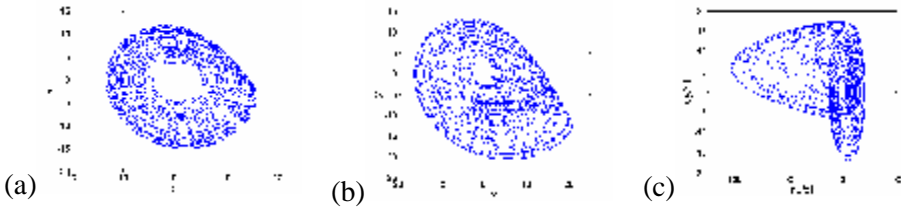


Рис.1 Хаотические аттракторы в системе Ресслера

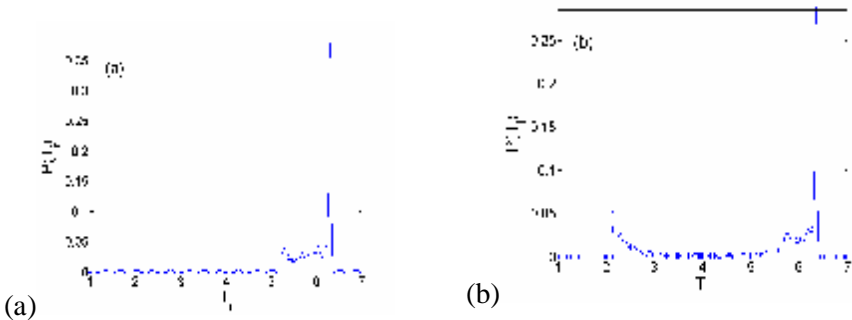


Рис.2 Распределение времен возврата в случае хаотических колебаний на (a) одном и (b) двух временных масштабах в системе Ресслера

Исследованы синхронизация осцилляторов Ресслера в режиме аттрактора типа "воронка", синхронизация и десинхронизация систем с хаотической перемежаемостью, синхронизация и десинхронизация последовательностей нескольких импульсов (берстов) в экспериментальной установке и численной модели взаимодействующих лазеров.

В зависимости от значения бифуркационного параметра система Ресслера может демонстрировать два типа хаотических колебаний: вращение с переменной амплитудой вокруг некоторого центра в проекции на плоскость двух фазовых переменных (Рис.1(a)) и аттрактор типа «воронка», в проекции которого нельзя выделить определенного центра вращений (Рис.1(b)). Распределение времен возврата,

определяемых интервалами между последовательными пересечениями секущей $\{x=0, y<0\}$, показывает, что в первом случае наблюдаются колебания с одним ярко выраженным временным масштабом (Рис.2(a)), во втором – с двумя (Рис.2(b)).

Для колебаний первого типа фаза обычно вводится как $j = \arctan \frac{y}{x}$, аналогично случаю регулярных квазигармонических колебаний, а средняя частота как $w = \lim_{t \rightarrow \infty} (j(t) - j(0)) / t$. Этот способ, однако, неприменим в случае колебаний второго типа. Было предложено рассматривать величину мгновенной угловой скорости в проекции как мгновенную частоту колебаний: $j\dot{=} \frac{y\dot{x} - x\dot{y}}{\sqrt{x^2 + y^2}}$. Было показано, что такое

геометрическое определение фазы эквивалентно $j = \arctan \frac{y}{x}$, получаемому в результате проецирования фазовой траектории на плоскость (x, y) . Условием применимости такого определения является знакопостоянство кривизны траектории в проекции на некоторую плоскость в фазовом пространстве. Это гарантирует наличие единого центра вращений в новой проекции и монотонность фазы (Рис.1(c)). Таким образом, для двух различных временных масштабов может быть введена *единая фаза*.

Данный подход позволил исследовать процесс фазовой хаотической синхронизации двух неидентичных систем Ресслера с колебаниями на двух временных масштабах. Было установлено, что при наличии нескольких ярко выраженных временных масштабов, необходимым условием для фазовой хаотической синхронизации становится функциональная зависимость между амплитудами осцилляторов (один из положительных ляпуновских показателей становится отрицательным).

Другой метод введения фазы – *разделение* временных масштабов – был применен к анализу процессов синхронизации и десинхронизации в малых ансамблях систем с хаотической перемежаемостью и лазеров в режиме генерации сложных хаотических импульсов. Суть этого метода (часто используемого в нейродинамике, и, как показано в работе, применимого к гораздо более широкому классу систем) заключается во введении фазы для одного из временных масштабов (более медленного) и предположении о независимости колебаний на разных масштабах. В частности, для лазеров, генерирующих пакеты импульсов большой амплитуды (условно названные берстами), которые перемежаются

длительными периодами генерации импульсов малой амплитуды (Рис.3), можно рассматривать фазу и частоту «берстов». Было обнаружено наличие фазовой хаотической синхронизации на этом временном масштабе при достаточно большой силе связи, а также десинхронизации при дальнейшем усилении связи (Рис.4). Синхронизация отдельных импульсов (на быстром временном масштабе) отсутствовала. Аналогичные результаты были получены для систем с хаотической перемежаемостью.

Во **второй главе** демонстрируется и анализируется механизм генерации колебаний на новом временном масштабе в виде пакетов электрических импульсов (берстов) в ансамблях нейронных осцилляторов,

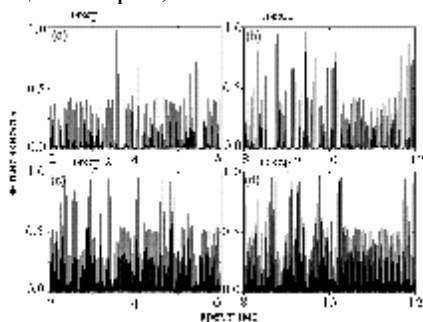


Рис.3 Динамика «берстовых» импульсов в (a,c) автономных лазерах и (b,d) взаимодействующих лазерах в режиме синхронизации.

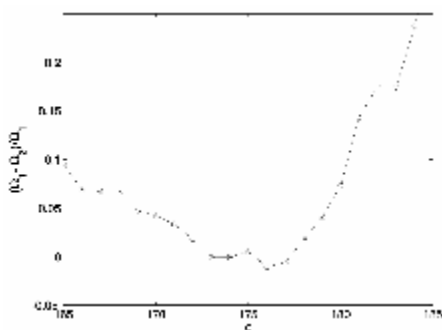


Рис.4 Зависимость наблюдаемой расстройки средних частот «берстовых» импульсов от силы связи между лазерами.

находящихся в режиме генерации одиночных электрических импульсов (спайков). В численном моделировании использовались следующие математические модели нейрона.

1. Модель Рулькова (N.F. Rulkov, 2002,2004) – двумерное отображение

$$\begin{cases} x_j^{k+1} = f(x_j^k, x_j^{k-1}, y_j^k) + \frac{e}{K} \sum_{i=j\pm 1} G(x_i^k, x_j^k) \\ y_j^{k+1} = y_j^k - m(x_j^k + 1) + ms_j + m \frac{e}{K} \sum_{i=j\pm 1} G(x_i^k, x_j^k) \end{cases}$$

где нелинейная функция, описывающая динамику индивидуального осциллятора

$$f(x, \tilde{x}, y) = \begin{cases} a/(1-x) + y, & x \leq 0, \\ a + y, & (0 < x < a + y) \cup (\tilde{x} \leq 0), \\ -1, & (x > a + y) \cap (\tilde{x} > 0), \end{cases}$$

x_j и y_j – быстрая и медленная переменные, $a = 3.5$, $s_i \in [0.15, 0.16]$, $\mu = 0.001$ – параметры нейронного осциллятора, задающие режим хаотических спайков. Сила связи ε нормируется на число связей осциллятора K с соседями, которые определяются топологией ансамбля; в простейшем случае цепочки, например, $K=2$. Использовались также два типа связи между нейронами, известные как электрический $G(x_i^k, x_j^k) = x_i^k - x_j^k$ и химический: $G(x_i^k, x_j^k) = (1 - x_j^k) \chi(x_i^k)$, где $\chi(\cdot)$ – функция Хевисайда.

2. Модель типа Ходжкина-Хаксли (А. Komendantov, N. Kononenko, 1996).

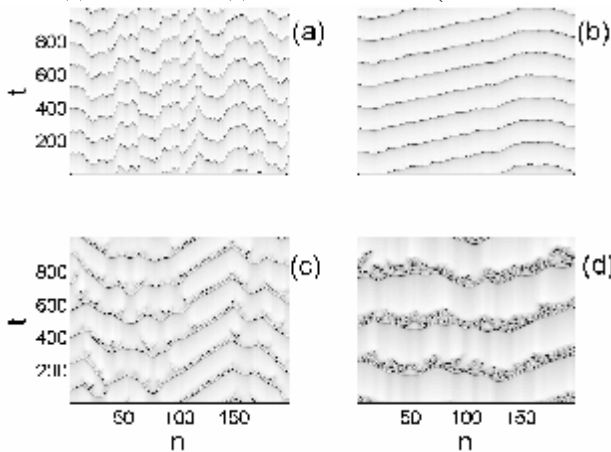


Рис.5 Динамика цепочки нейронных осцилляторов: (a) несинхронные спайки, (b) синхронные спайки, (c) нерегулярные берсты, (d) регулярные синхронные берсты (горизонтальная ось – координата, вертикальная – время, оттенки серого – величина x_j^k).

При численном моделировании цепочек нейронных осцилляторов Рутькова с электрической связью было обнаружено, что при увеличении силы связи между нейронами сначала наступает режим хаотической фазовой синхронизации спайков (неидентичные частоты спайков подстраиваются под единую частоту) (Рис.5(a), $\varepsilon=0.005$, синхронизация отсутствует, Рис.5(b), $\varepsilon=0.05$, спайки синхронизованы). Однако при дальнейшем усилении связи режим синхронизации спайков теряет устойчивость, что приводит к генерации берстов (Рис.5(c), $\varepsilon=0.1$). При дальнейшем увеличении связи берсты регуляризируются и становятся синхронизованными (Рис.5(d), $\varepsilon=0.2$), причем спайки, их образующие,

остаются несинхронизованными, и на пространственно-временной диаграмме образуют структуры фрактального типа. Зависимость распределения межспайковых интервалов от силы связи на Рис.6 наглядно иллюстрирует возникновение нового – берстового – временного масштаба колебаний.

Механизм десинхронизации одиночных спайков, приводящей к формированию берстов, объясняется исходя из результатов качественного анализа структуры фазового пространства автономного двумерного модельного нейронного отображения. Существование данного механизма генерации берстов показано при моделировании нейрона с помощью двумерного отображения Рутькова и биологически обоснованной модели типа Ходжкина-Хаксли; при использовании как электрического, так и возбуждающего, и смешанного - возбуждающего и ингибиторного типов синаптической связи; в ансамблях различной топологии: малые ансамбли, цепочки, двухслойные цепочки, ансамбли "small-world" и "scale-free".

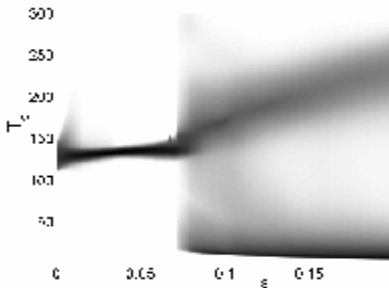


Рис.6 Зависимость распределения межспайковых интервалов T_s от силы связи ϵ . Черный цвет – максимальное значение, белый – минимальное.

Эти результаты позволяют сделать вывод об общности обнаруженного механизма.

В третьей главе исследуется эффект взаимной синхронизации между колебаниями на различных временных масштабах во взаимодействующих малых ансамблях нейронных осцилляторов. В каждом ансамбле реализуется режим берстовых колебаний, которые генерируются за счет конкуренции нейронов. Ансамбль, состоящий из трех нейронных осцилляторов Хиндмарш-Розе с ингибиторным типом связей, описывается уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_i = y_i + ax_i^2 - x_i^3 - z_i + I_i + \sum_{j \neq i} I_{syn}^{ij}, \\ \dot{y}_i = b - cx_i^2 - y_i, \\ \dot{z}_i = m(-z_i + e(x_i + d)), \end{array} \right.$$

где $i = \overline{1,3}$, $a = 3.0$, $b = 1.0$, $c = 5.0$, $d = 1.6$, $e = 4.0$, $m = 0.002$, постоянный внешний ток, задающий режим спайков в автономных нейронах $I_i = 6.0$. Токи через ингибиторные синапсы определяются как

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{syn}^{ij} = g^{ij} S(t)(x_{rev} - x_i), \\ t_s \mathcal{S}(t) = \frac{S_\infty - S(t)}{1 - S_\infty}, \\ S_\infty = \coth\left(\frac{x_i - x_{th}}{x_s}\right) \end{array} \right.$$

где $t_s = 3.0$, $x_{th} = -0.5$, $x_s = 1.0$, $x_{rev} = -1.5$, максимальная проводимость синапса $r = r^{12} = r^{23} = r^{31} = 1/r^{21} = 1/r^{13} = 1/r^{32}$ задает силу асимметричной связи и определяет период берстовых колебаний.

Два малых ансамбля, период берстовых колебаний в одном из которых значительно больше, чем в другом, взаимодействуют через ингибиторную связь между двумя нейронами. Обнаружено, что ширина полосы синхронизации на высоких субгармониках сравнима с шириной на низких субгармониках (Рис.7). Следует отметить, что при кратности частот большей 6:1 полоса синхронизации быстро уменьшается. Показано, что для достижения больших соотношений частот при сохранении широкой полосы синхронизации можно использовать цепочку из трех малых ансамблей, в которой первый и второй, а также второй и третий синхронизированы с относительно низким соотношением частот, а первый и третий, в результате, оказываются синхронизованными с высоким соотношением, равным произведению соотношений соседних ансамблей. Заметим, что для регулярных квазипериодических колебаний ширина полосы синхронизации быстро убывает с возрастанием кратности частот, и синхронизация между колебаниями на существенно различных временных масштабах является практически ненаблюдаемой.

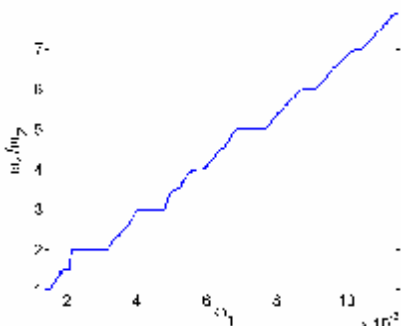


Рис.7 Плато синхронизации берстовых колебаний на субгармониках между двумя малыми ансамблями нейронных осцилляторов.

Показано, что синхронизация берстовых колебаний в ансамбле из трех модельных нейронов Хиндмарш-Розе со взаимной асимметричной ингибиторной связью представляет собой последовательную генерацию берстов в каждом из нейронов. Установлено, что параметром, определяющим изменение характеристик берстов при усилении взаимного ингибирования является соотношение между длительностью последовательности спайков, образующих берст, и полным периодом берста в автономном нейроне.

В **четвертой главе** исследовано образование кластеров синхронизации в нерегулярных сетях фазовых осцилляторов с асимметричными связями. Ансамбль неидентичных отображений окружности описывается уравнениями:

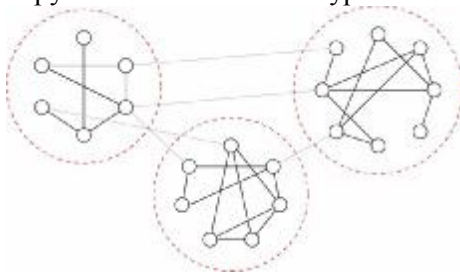


Рис.8 Пример сети с ярко выраженной модульностью

Наличие широких областей синхронизации берстовых колебаний на высоких субгармониках позволяет рассматривать этот эффект как потенциальный механизм координации биологических нейронных ритмов с различными характерными частотами.

Кроме того, в данной главе исследованы закономерности формирования структур синхронизации, возникающих при конкурентном типе взаимодействия между многомасштабными колебаниями.

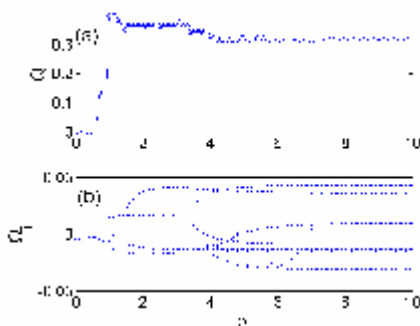


Рис.9 Зависимость (а) модульной модулярности (мера

структурой.

оптимальности разбиения на модули и (b) частоты кластерных структур от управляющего параметра.

$$j_i^{(n+1)} = j_i^{(n)} + w_i + \frac{d}{\sum_{j \in N_i} b_{ij}^a} \sum_{j \in N_i} b_{ij}^a \sin(j_j^{(n)} - j_i^{(n)}),$$

где $w_i \in [-0.1, 0.1]$ - собственные частоты, d - сила связи, a - управляющий параметр, b_{ij} - нагрузка ребра $\{i, j\}$, определяемая как число кратчайших путей на графе, содержащих это ребро, N_i - множество соседей элемента i .

Показано, что если при $a = 0$ все отображения были синхронизованными, то при уменьшении этого параметра глобальная синхронизация нарушается, формируются различные кластеры синхронизации, причем эти кластеры с высокой точностью соответствуют топологической модульной структуре сети.

Исходя из этого результата, был предложен метод анализа структуры сложных сетей с использованием эффектов кластерной синхронизации и десинхронизации. Задача выявления структуры сети заключается в обнаружении т.н. модулей - тесно связанных внутри и менее тесно между собой групп узлов, т.е. разбиения графа на некоторое число подграфов, с минимизацией числа ребер, соединяющих различные подграфы (Рис.7(a)). Таким образом, суть метода анализа топологической структуры произвольной сети заключается в отождествлении динамических систем – осцилляторов – вершинам графа, функциям связи – ребрам, использовании весовых коэффициентов, вычисляемых по приведенному способу и последовательному уменьшению управляющего параметра с проверкой наблюдаемой кластерной структуры на оптимальность (Рис.7(b)). Применяя данный метод к известным тестовым задачам и сравнивая полученные результаты с характеристиками других известных (не динамических) методов было показано, что предложенный метод является корректным, эффективным. Превосходя по точности и скорости имеющиеся нединамические алгоритмы, он является крайне перспективным для задач анализа структуры больших метаболических, протеиновых и социальных сетей, недоступных для имеющихся методов при современных вычислительных мощностях.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы

Основные результаты диссертационной работы

1. Развита теория фазовой хаотической синхронизации для хаотических систем с колебаниями на нескольких временных масштабах. Показано, что для анализа этого явления фаза и средняя частота колебаний могут быть введены либо путем объединения временных масштабов (определяется единая фаза для многомасштабных колебаний), либо разделения временных масштабов (фаза определяется только для одного из временных масштабов).
2. На примере хаотической модели Ресслера продемонстрировано, что необходимым условием установления фазовой хаотической синхронизации между осцилляторами, допускающими объединение временных масштабов, является наличие функциональной связи не только между фазами, но и амплитудами колебаний взаимодействующих осцилляторов.
3. На примере нейроноподобной берстовой динамики связанных лазеров и систем с хаотической перемежаемостью показано, что при разделении временных масштабов на одном из масштабов (как правило, медленном) при увеличении силы связи устанавливаются синхронные колебания, десинхронизирующиеся при дальнейшем усилении связи. В то же время, на другом временном масштабе колебания остаются несинхронизованными.
4. Обнаружено, что за счет взаимодействия, коллективной динамики нейроноподобные осцилляторы могут демонстрировать генерацию колебаний на новом, быстром временном масштабе колебаний. Механизмом такой генерации является неустойчивость режима фазовой синхронизации одиночных электрических импульсов (спайков) при увеличении силы связи выше определенного порогового значения. В результате наблюдается появление быстрых повторных спайков и формирование последовательностей из нескольких электрических импульсов (берстов). Существование обнаруженного механизма было подтверждено не только для различных типов связи между нейронами, но и для различных математических моделей нейрона, различных вариантов топологии ансамбля, что указывает на общность данного механизма.

5. Были исследованы механизмы синхронизации между колебаниями на разных временных масштабах. Показано, что области взаимной синхронизации берстовых колебаний в малых ансамблях нейроноподобных осцилляторов, генерируемых за счет конкуренции (взаимного ингибирования), являются более широкими на субгармониках (то есть, когда частоты берстов в одном ансамбле в несколько раз превосходят частоты берстов в другом), чем на основной частоте (1:1) или при соотношении 2:1. Предложенный метод синхронизации посредством вспомогательного, промежуточного нейронного ансамбля позволяет обеспечить синхронизацию для очень большой кратности отношения частот берстов (порядка 20:1) при сохранении широких областей синхронизации.
6. Были изучены особенности формирования структур синхронизации колебаний на нескольких временных масштабах при наличии конкуренции между ними. Продемонстрировано, что синхронизация берстовых колебаний в ансамбле из трех модельных нейронов Хиндмарш-Розе со взаимной асимметричной ингибиторной связью представляет собой последовательную генерацию берстов в каждом из нейронов. Установлено, что параметром, определяющим изменение характеристик при усилении взаимного ингибирования является соотношение между длительностью последовательности спайков, образующих берст, и полным периодом берста в автономном нейроне.
7. На базе полученных результатов по процессам образования структур кластерной синхронизации в сетях фазовых осцилляторов с асимметричными неоднородными связями разработан динамический метод анализа структуры больших сложных сетей. Было показано, что он характеризуется более высокой точностью результатов, чем другие известные не динамические методы, а также, асимптотика его вычислительных затрат в сетях большого размера улучшает показатели почти всех имеющихся методов.

Публикации

[1] G.V.Osipov, B.Hu, Ch.Zhou, M.V. Ivanchenko, J.Kurths, Three types of transition to phase synchronization in coupled chaotic oscillators, Phys. Rev. Lett. // v.91 024101 (2003).

- [2] M.V. Ivanchenko, G.V. Osipov, V.D. Shalfeev, J. Kurths, Phase synchronization of chaotic intermittent oscillations // Phys. Rev. Lett., V.92, 134101,2004.
- [3] G. V. Osipov, M. V. Ivanchenko, J. Kurths, and B. Hu, Synchronized chaotic intermittent and spiking behavior in coupled map chains // Phys. Rev. E. Vol. 71. p. 056209, 2005.
- [4] J. Kurths, M.C. Romano, M. Thiel, G.V. Osipov, M.V. Ivanchenko, I.Z. Kiss, J.L. Hudson, Synchronization analysis of coupled noncoherent oscillators // Nonlinear Dynamics, Vol. 44 (1-4), 2006, pp. 135-149.
- [5] R. Meucci, F. Salvadori, M.V. Ivanchenko, K. Al Naimee, Ch. Zhou, F.T. Arecchi, S. Boccaletti, and J. Kurths, Synchronization of spontaneous bursting in a CO2 laser // Phys. Rev. E 74, 066207, 2006.
- [6] M.V. Ivanchenko, G.V. Osipov, V.D. Shalfeev and J. Kurths, Network mechanism for burst generation, Physical Review Letters // V.98, 108101, 2007.
- [7] М.В. Иванченко, Генерация берстов в ансамблях спайковых нейронов с нелокальными связями // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика, т.15, №3, стр. 3, 2007.
- [8] S.Boccaletti, M.V. Ivanchenko, A.Pluchino, V.Latora, A.Rapisada, Dynamical clustering methods to find community structures // ArXiv: physics/0607179 v1.
- [9] G.V. Osipov, M.V. Ivanchenko, Ch. Zhou, J.Kurths, Routes to phase synchroni-zation in coupled chaotic oscillators // Proceedings of NDES, May 18-21, 2003, Switzerland, 189-192.
- [10] M.V. Ivanchenko, G.V. Osipov, V.D. Shalfeev, Synchronization of Chaotic Oscillators with Type-I Intermittency // Proc. of PhysCon 2003, August 20-22, 2003, Saint Petersburg, Russia, 563-568.
- [11] M.V. Ivanchenko, Synchronization in chaotic ensembles with oscillations on multiple time scales // Proc. Int. Symposium Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2005). NWP-1 Nonlinear dynamics: theory and applications. Nizhny Novgorod, Institute of Applied Physics RAS, 2005.
- [12] M.V.Ivanchenko, G.V.Osipov, Synchronization and desynchronization in chaotic spiking chain ensembles // Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Bruges, Belgium, October 18-21, 2005, pp.703-706.
- [13] G.V. Osipov, M.V. Ivanchenko, V.D. Shalfeev, J. Kurths, Synchronization of Chaotic Intermittent Behavior // 2nd International Conference Physics and Control, Saint Petersburg, Russia, August 24-26, 2005.

[14] M.V. Ivanchenko, G.V. Osipov, J. Kurths, Synchronization and desynchronization in chaotic spiking neural networks // Abstracts of 13th International IEEE Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems NDES-2005, September 18-22 2005, University of Potsdam, Germany.

[15] М.В. Иванченко, Синхронизация и десинхронизация спайковой динамики в ансамблях нейроноподобных осцилляторов // Тезисы конференции молодых ученых Нелинейные волновые процессы, Нижний Новгород 1-7 марта 2006 г., стр.71-72.

Оглавление диссертации

Введение

Глава 1. Анализ синхронизации в системах с «многомасштабным» хаосом

1.1 Объединение временных масштабов 1.2 Разделение временных масштабов. 1.3 Синхронизация лазеров в режиме генерации берстов 1.4 Выводы

Глава 2. Коллективные механизмы генерации колебаний на новом временном масштабе в ансамблях нейронных осцилляторов

2.1 Генерация берстов в цепочках спайковых нейронов 2.2 Генерация берстов в ансамблях с химическими синапсами 2.3 Генерация берстов в ансамблях со сложной топологией связей 2.4 Генерация коллективных берстов модельными нейронами Ходжкина-Хаксли 2.5 Выводы

Глава 3. Синхронизация и образование структур: конкуренция колебаний на различных временных масштабах

3.1 Взаимная синхронизация между колебаниями на различных временных масштабах 3.2 Структуры синхронизации конкурирующих колебаний на нескольких временных масштабах 3.3 Выводы

Глава 4. Динамический анализ структуры сложных сетей

4.1 Структура сложных сетей 4.2 Нединамические методы анализа 4.2 Кластерная синхронизация: динамический анализ 4.3 Выводы

Заключение

Библиография