

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Нелинейная динамика многослойной сети нейронных моделей <i>А.В. Андреев, В.В. Макаров, А.Н. Писарчик, А.Е. Храмов</i>	3
Влияние радиации на нервную систему: нелинейно-динамические модели <i>А.С. Батова, А.Н. Бугай, Э.Б. Душанов, А.Ю. Пархоменко</i>	7
Эволюция аттрактора Плыкина - Ньюхауса методом Пирагаса <i>С.Т. Белякин, С.А. Шутеев, С.П. Кузнецов</i>	10
Экстремальные события на сигналах ЭЭГ грызунов с индуцированным инсультом <i>В.В. Грубов</i>	12
Явление ассортативности в сетях с пространственно-распределенной топологией <i>Д.В. Кирсанов, В.В. Макаров</i>	14
Гиперболический хаос в связанных автоколебательных системах, функционирующих с возбуждением релаксационных автоколебаний <i>В.М. Дорошенко, В.П. Круглов, С.П. Кузнецов</i>	16
Нелинейная динамика, почти-периодическое суммирование, автоколебательные процессы, информационное кодирование в избирательных импульсных нейронных сетях <i>М.Е. Мазуров</i>	20
Торнадо – автоколебательная система в активной среде, генерирующая вогнутые спиральные автоволны и атмосферные вихри <i>М.Е. Мазуров</i>	24
Частотно-временные характеристики ЭЭГ во время просмотра образовательного материала <i>В.В. Макаров, Н.С. Фролов</i>	28
Фолдинг белков как процесс автоволновой самоорганизации в активных средах <i>Е.В. Малышко, В.А. Твердислов</i>	30
Интерфейс мозг-компьютер для оценки психофизиологического состояния человека <i>Е.Н. Пищик, В.А. Максименко, В.О. Недайвозов, А.Е. Храмов</i>	33
Колебательные и волновые процессы в интегрированных сегнетоэлектрических устройствах нового типа <i>А.Э. Рассадин, И.В. Ракуть</i>	36
Шахматная доска молекулярной биологии <i>В.А. Твердислов</i>	40

Автоволновая модель урбоэкосистем как процесс автоволновой самоорганизации в активных средах	
<i>А.Е. Семина, Н.Т. Левашова, А.А. Мельникова, А.Э. Сидорова</i>	<i>41</i>
Метод восстановления связей между отделами головного мозга человека в процессе обучения по данным электроэнцефалограммы	
<i>Н.С. Фролов, Д.В. Кирсанов.....</i>	<i>44</i>
Помехоустойчивость OFDM-системы связи на базе Вейвлет-преобразования в зависимости от полосы частот, куда вводятся селективные замирания	
<i>Е.Н. Рычков, Ю.А. Пирогов</i>	<i>46</i>

Нелинейная динамика многослойной сети нейронных моделей

А.В. Андреев¹, В.В. Макаров¹, А.Н. Писарчик^{1,2}, А.Е. Храмов¹

¹*Саратовский государственный технический университет имени Гагагина Ю.А., Саратов*

²*Центр биомедицинских технологий, Технический университет Мадрида, Мадрид*

andreevandre1993@gmail.com

Головной мозг является одним из самых сложных динамических систем. Для изучения динамики мозга применяются различные подходы, в том числе физиологические, биохимические и математические. Рассмотрение нейронной системы мозга как сети связанных динамических единиц является эффективным математическим способом моделирования сложного поведения реальной нейронной системы. Многочисленные исследования посвящены изучению структурных свойств таких нейронных сетей, которые могут помочь в лучшем понимании динамических свойств реальных синаптически связанных нейронных сетей [1].

Существуют две основные причины, по которым развитие эффективных нейронных моделей является важным. Во-первых, хорошая математическая модель может дать глубокое понимание механизмов, ответственных за память, принятие решений и различные формы обработки сенсорной информации. Во-вторых, они позволяют разработать эффективные искусственные интеллектуальные системы, которые используют алгоритмы принятия решений и управления на основе нейроморфных принципов обработки информации. Открытие когнитивных механизмов, лежащих в основе восприятия различных форм стимулов, позволяет значительно повысить эффективность программных методов, используемых в различных нейробиологических устройствах, таких как нейроинтерфейсы на основе обратной связи [2,3], экзоскелеты [4] и протезы [5]. Помимо биомедицинского аспекта технологии, разработанные на основе существующих знаний о функционировании мозга, активно используются в методах машинного обучения [6].

В данной работе проводится исследование динамики многослойной сети глобально связанных нейронных осцилляторов со случайно распределенными силами связи при наличии шума в каждом из них. В качестве модельного нейрона мы выбирали отображение Рутькова [7]. Следует отметить, что модели нейронов на основе отображений очень эффективны для численного моделирования нейронной динамики и функциональности в нейробиологических сетях, поскольку они позволяют изучать взаимодействие между отдельными нейронами и колебаниями среднего поля, сформированными в крупномасштабных сетях. Они также могут быть использованы для реализации биологических нейронных механизмов, ответственных за обработку сенсорной информации, такой как визуальная, слуховая и тактильная, а также для создания синтетических нейробиологических контроллеров реального времени для биометрических роботов и нейронных протезов.

В последнее время нейронная пачечная активность изучалась в сети глобально связанных отображений Рутькова [8]. Авторы статьи исследовали сетевую синхронизацию путем анализа макроскопического сигнала всей сети. Такой подход очень удобен, когда микроскопический доступ к отдельным нейронам невозможен, например, для моделирования экспериментов с нейронными культурами, выращенными на многоэлектродной матрице. В ней показано, что синхронная коллективная пачечная активность многих нейронов связана с некоторыми патологическими состояниями, например эпилепсией [9] и мигренью [10]. В настоящей

работе используется тот же макроскопический подход, чтобы выявить механизмы, ответственные за закономерность коллективной динамики и сетевой когерентности.

Каждый элемент Рудькова описывается следующей системой уравнений [13]:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= f(x_n, x_{n-1}, y_n + \beta_n), \\ y_{n+1} &= y_n - \mu(x_n + 1) + \mu\sigma + \mu\sigma_n + \mu A^\xi \xi_n, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_n – быстрая переменная, связанная с мембранным потенциалом и отражающая взаимодействие “быстрых ионных токов”, y_n – медленная переменная, которая моделирует динамическое “действие медленных ионных токов”. Медленное изменение во времени переменной y_n обуславливается малостью параметра μ . Параметр σ задает невозмущенное состояние нейрона. ξ – гауссовский шум с нулевым средним и стандартным отклонением, равным 1, A^ξ – амплитуда шума. β_n и σ_n связаны с внешним стимулом, f – разрывная функция следующего вида:

$$f(x_n, x_{n-1}, y_n) = \begin{cases} \alpha / (1 - x_n) + y_n, & x_n \leq 0 \\ \alpha + y_n, & 0 < x_n \leq \alpha + y_n \vee x_{n-1} \leq 0 \\ -1, & x_n \geq \alpha + y_n \wedge x_{n-1} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Она построена таким образом, чтобы воспроизводить различные режимы нейронной активности, такие как генерация спайков, пачечная динамика и режим молчания. α является контрольным параметром отображения, параметры β_n и σ_n определяются как:

$$\begin{aligned} \beta_n &= \beta^e I_n^{ext} + \beta^{syn} I_n^{syn}, \\ \sigma_n &= \sigma^e I_n^{ext} + \sigma^{syn} I_n^{syn}. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты β^e и σ^e используются для балансировки внешних токов I_n^{ext} . β^{syn} и σ^{syn} – коэффициенты синаптической связи. I_n^{ext} – синаптический ток:

$$I_{n+1}^{syn} = I_n^{syn} - g_{syn} * \begin{cases} (x_n^{post} - x_{tp}), & \text{spike}^{pre}, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

где g_{syn} – сила синаптической связи, $g_{syn} > 0$. Индексы *pre* и *post* соответствуют пресинаптическим и постсинаптическим переменным соответственно. Первое условие в (4) соответствует моменту генерации пресинаптического импульса (спайка) и определяется как $x_n^{pre} \geq \alpha + y_n^{pre} + \beta_n^{pre}$. Параметр γ – время релаксации синапса, $0 \leq \gamma \leq 1$. Он определяет часть синаптического тока, которая присутствует в следующей итерации. x_{tp} – обратный потенциал, который определяет тип синапса: подавляющий или возбуждающий.

В моделировании значения параметров $\alpha = 3,65$, $\sigma = 0,06$, $\mu = 0,0005$ выбраны таким образом, чтобы каждый нейрон, будучи автономным, находился в режиме молчания. Также полагаются $\beta^e = 0,133$, $\sigma^e = 1,0$, $\beta^{syn} = 0,1$, $\sigma^{syn} = 0,5$ и $x_{tp} = 0,0$. Связи между нейронами являлись химическими и представляли собой структуру «все со всеми», но сила связи выбиралась случайным образом из некоторого диапазона, при этом между нейронами разных слоев она была в 2 раза меньше, чем между нейронами внутри одного слоя. Внутри каждого слоя все связи являлись возбуждающими в то время, как между слоями часть связей была возбуждающей, а другая часть – ингибиторной. На часть нейронов в первом слое подавалось внешнее воздействие постоянной амплитуды, которое переводило их в возбужденное состояние, в котором они начинали непрерывно генерировать спайки. В зависимости от силы связи спайки в пресинаптическом нейроне приводили к генерации спайков и в постсинаптическом нейроне, на который при этом не подавалось никакого внешнего воздействия.

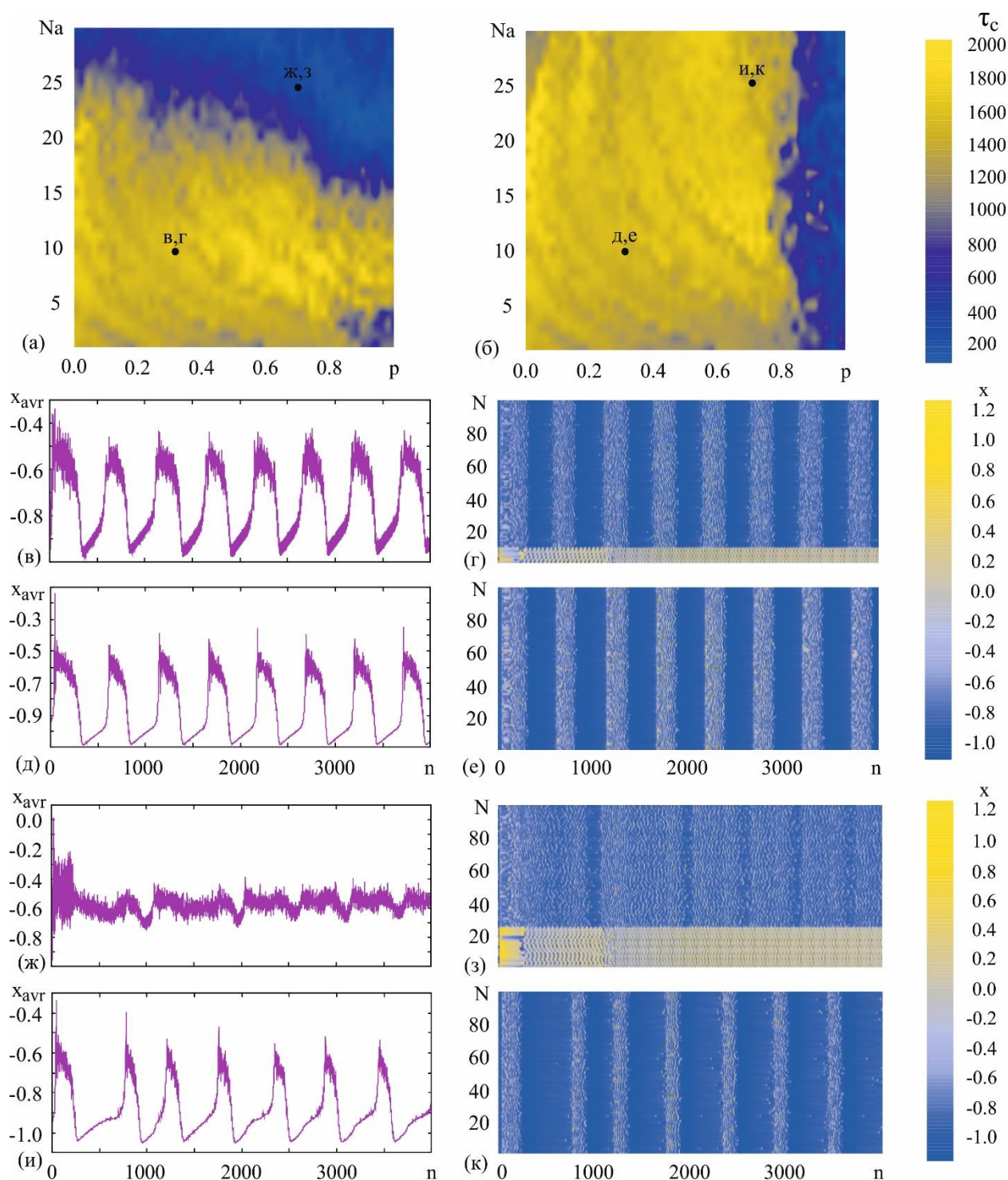


Рис. 1. (а,б) Двухпараметрические зависимости характерного времени корреляции τ_c от числа стимулируемых нейронов в первом слое N_a и доли ингибиторных связей между слоями p . (в,д) Временные зависимости мембранного потенциала, усредненного по всем нейронам, и (г,е) зависимости мембранного потенциала x от времени n и номера нейрона N в первом и втором слоях соответственно при значениях $N_a=10, p=0.3$. (ж-к) То же, что и на (в-е), но при $N_a=25, p=0.75$.

Была исследована динамика данной сети в зависимости от таких параметров, как число стимулируемых нейронов и доля ингибиторных связей между слоями. Для этого были построены и проанализированы как двухпараметрические зависимости амплитуды колебаний мембранного потенциала каждого нейрона в зависимости от времени и номера нейрона, так и усредненные по всей сети и каждому слою временные

зависимости мембранного потенциала для различных значений числа стимулируемых нейронов и доли ингибиторных связей между слоями. Также для проведения более полноценного анализа динамики исследуемой системы была рассчитана такая характеристика, как характерное время корреляции, которая является одной из мер когерентности сети:

$$\tau_c = \sum_{n_0}^N C(\tau)^2 \quad (5)$$

где n_0 – количество итераций переходного процесса, N – общее число итераций, $C(\tau)$ - автокорреляционная функция, определяемая как:

$$C(\tau) = \frac{\langle (x(n) - \langle x \rangle)(x(n+\tau) - \langle x \rangle) \rangle}{\langle (x(n) - \langle x \rangle)^2 \rangle} \quad (6)$$

где x – усредненный сигнал, $\langle x \rangle$ - усреднение по времени от n_0 до N .

Были построены двухпараметрические зависимости данной характеристики от числа стимулируемых нейронов в первом слое и доли ингибиторных связей между слоями для каждого слоя (рис. 1).

В результате данного исследования было обнаружено явление образования пространственно-временных структур как внутри каждого слоя, так и глобальных (межслойных). Были изучены процессы их формирования и взаимодействия между ними.

Был обнаружен эффект образования пространственно-временных структур, когда все нестимулируемые нейроны начинали несинхронизованно генерировать спайки в течении некоторого периода времени, затем все они переходили в режим «молчания», а после некоторого промежутка времени снова начинали генерировать спайки и т.д. (рис.1 г,е). При этом на усредненных по всем нейронам сигналах прослеживается возникновение высокочастотной активности (рис.1 в,д). Были обнаружены области количества стимулируемых нейронов и доли ингибиторных связей между слоями, когда система находится в состоянии наибольшей когерентности, характеризующейся при этом максимальным значением характерного времени корреляции. В данном состоянии система способна воспринимать и обрабатывать входящие сигналы наиболее эффективно. На ряду с вышесказанным были обнаружены области данных параметров, при которых динамика в первом и втором слое кардинально отличается (рис.1 ж-к).

Численное моделирование выполнено при поддержке Президента РФ (грант МК-5850.2018.2), анализ полученных данных осуществлен при поддержке Президента РФ (грант НШ-2737.2018.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. O.V. Maslennikov, V.I. Nekorkin // Phys. Usp. 2017. V. 60. P. 694-704.
2. H.J. Hwang, K. Kwon and C.H. Im // Journal of Neuroscience Methods. 2009. V. 179. P. 150-156.
3. V. A. Maksimenko et al. // Scientific Reports. 2017. V. 7. No. 1. P. 2487.
4. A.M. Dollar and H. Herr // IEEE Transactions on Robotics. 2008. V. 24. P. 144-158.
5. M. Haugland and T. Sinkjkr // Technology and Health Care. 1999. V. 7. P. 393-399.
6. N.M. Nasrabadi // Journal of Electronic Imaging. 2007. V. 16. P. 049901.
7. N.F. Rulkov, I. Timofeev, M. Bazhenov // J. Comp. Neuroscience. 2004. V. 17. P. 203-223.
8. F.A.S. Ferrari et al. // New J. Phys. 2015. V. 17. P. 055024.
9. K. Lehnertz, C.E. Elger. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. P. 5019–5022.
10. L. Angelini. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 038103.

Влияние радиации на нервную систему: нелинейно-динамические модели

А.С. Батова, А.Н. Бугай, Э.Б. Душанов, А.Ю. Пархоменко

Объединенный институт ядерных исследований

bugay_aleksandr@mail.ru

В последние годы развитие радиационной терапии опухолей головного мозга, а также опасность для дальних космических полетов, возникающая от потока галактического космического излучения (ГКИ) из тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), привели к пересмотру устоявшихся положений о радиорезистентности центральной нервной системы (ЦНС) [1]. В экспериментальных условиях были выявлены изменения в ЦНС на различных уровнях, начиная с субклеточного и заканчивая поведенческими реакциями. Исследования, выполненные *in vivo* (на экспериментальных животных) по действию ТЗЧ на структуры головного мозга, весьма ограничены сложностью экспериментов на ускорительных комплексах, в связи с чем, особое значение приобретают методы компьютерного моделирования.

Настоящий обзор посвящен текущему состоянию методов оценки действия радиации на структуры и функции ЦНС. Последовательной схемы, описывающей закономерности развития пострadiационных синдромов ЦНС в настоящее время не существует. В связи с этим предложено использовать феноменологическое описание, основанное на учете известных молекулярных нарушений. Хорошо известно, что при воздействии на клетки излучений с высокой линейной передачей энергии (ЛПЭ), по сравнению с редко ионизирующими излучениями, в клетках возникают сложные повреждения ДНК, а также запускаются окислительные процессы. Сложность таких повреждений крайне затрудняет их репарацию (восстановление), и этот процесс происходит с частичной потерей генетической информации. Все это впоследствии отразится на работе критических структур нервных клеток, обеспечивающих генерацию потенциала действия и его передачу по нейронным сетям.

Когнитивные функции головного мозга (фокусирование внимания, память, пространственная ориентация и исполнительные функции) рассматривают в контексте возникновения в мозге определенных пространственно-временных паттернов (ритмов, волн, и т.д.). Модели соответствующих нейронных сетей достаточно хорошо проработаны, поэтому включение в них радиационных нарушений позволит пролить свет на то, какие из них наиболее критичны для потери устойчивости рассматриваемых паттернов.

В настоящей работе рассмотрено два характерных примера нейронных сетей. Первый из них относится к осцилляциям в гиппокампе, вносящих вклад в формирование θ - и γ -ритмов головного мозга. Структура нейронных сетей областей CA1, CA3 гиппокампа такова [2], что при стимуляции входящих в ее состав нейронов происходит генерация синхронных по времени осцилляций (Рис.1).

Другой тип активности нейронов характерен, например, для префронтальной коры [3]. Так в ходе кратковременного удержания информации о некоторых объектах (рабочая память) стимуляция выделенных областей нейронной сети вызывает спонтанную активность с пространственной синхронизацией колебаний (Рис.2).

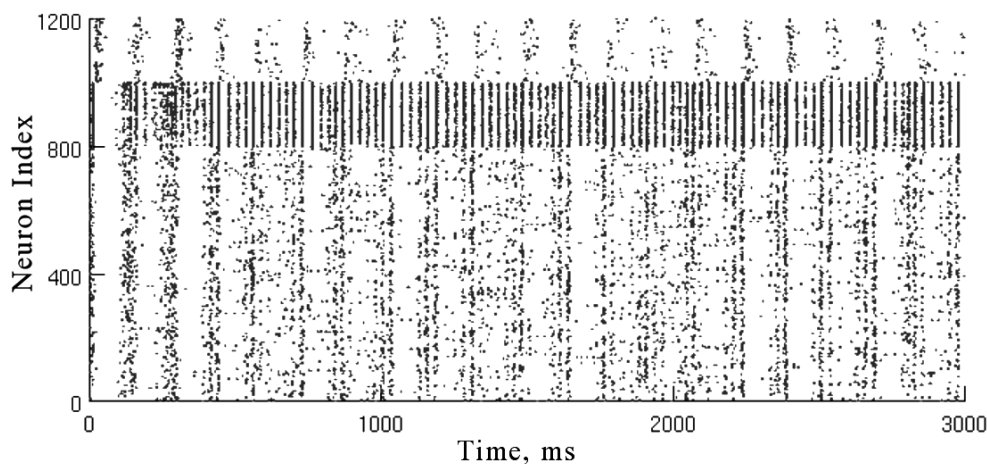


Рис. 1. Растрограмма спайков потенциала действия как результат временной синхронизации осцилляций различных групп нейронов гиппокампа. Данная активность вносит вклад в формирование θ - и γ -ритмов ЭЭГ.

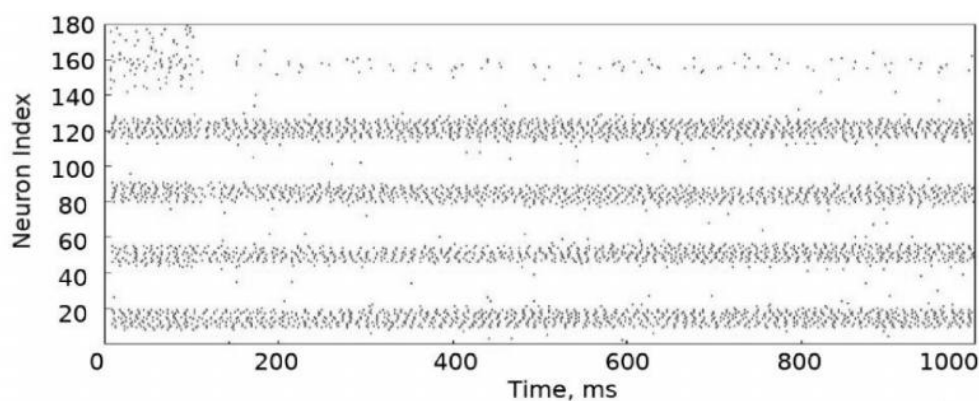


Рис. 2. Растрограмма спайков потенциала действия как результат пространственной синхронизации осцилляций различных групп нейронов префронтальной коры. Данная активность формируется в ходе удержания информации об объектах (рабочая память).

В качестве одного из характерных радиационных факторов, рассмотрим пример нарушения синаптической трансмиссии, осуществляющей передачу электрических сигналов между нейронами. При развитии различного рода нейродегенеративных заболеваний [4], а также после воздействия ионизирующих излучений [5] наблюдается целый ряд нарушений, связанных с изменением свойств синаптических NMDA-рецепторов. Предполагают, что данные эффекты имеют генетическую природу и связаны с возникновением мутаций в генах, кодирующих соответствующие белки. В ходе работы было произведено молекулярно-динамическое моделирование открытия ионного канала NMDA-рецепторов, построенных из мутантных форм белков. Анализ возникших конфигураций позволил определить изменение проводимостей ионных каналов, а полученные данные отражены в структурах нейронных сетей.

В результате удалось выявить влияние мутаций в белковых единицах NR2 рассматриваемых рецепторов на генерацию нейронной сетью гиппокампа ритмов, наблюдаемых в ЭЭГ. В частности, было подтверждены экспериментальные свидетельства [6] об уменьшении амплитуды θ -ритма после действия ионизирующих излучений (Рис.3).

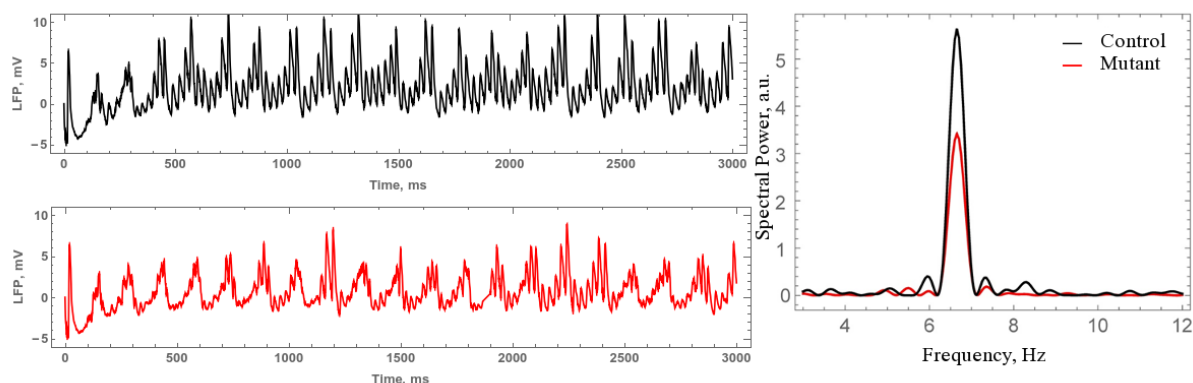


Рис. 3. Временная динамика и спектры мощности ЭЭГ гиппокампа при возникновении мутантных форм NMDA рецептора.

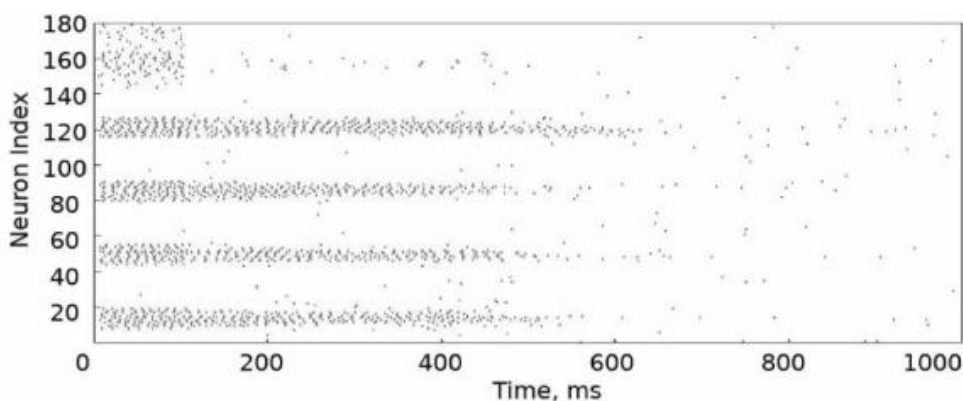


Рис. 4. Растрограмма спайков префронтальной коры при возникновении мутантных форм NMDA рецептора.

С другой стороны, мутантные формы рецептора оказывают влияние и на пространственную синхронизацию нейронов префронтальной коры. В этом случае наблюдается уменьшение объема рабочей памяти (максимальное число одновременно существующих паттернов), а также снижение времени их существования (Рис.4).

Полученные результаты могут быть адаптированы для дальнейшего анализа и оценки возможных когнитивных нарушений, возникающих в результате действия радиационных факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-29-01007).

ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Григорьев, Е.А. Красавин, М.А. Островский // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова 2013. Т.99. С.273.
2. H. Sanders, et al // J. Neurosci. 2013. V.33. P.424.
3. S.A. Neymotin et al. // J. Neurosci. 2011. V.31. P.11733.
4. N. Burnashev, P. Szepetowski // Curr. Op. Pharm. 2015. V.20. P.73.
5. L. Shi et al. // Radiat. Res. 2006. V.166. P.892.
6. I.V. Sokolova, et al. // Radiat. Res. 2015. P.183. V.208.

Эволюция аттрактора Плыкина - Ньюхауса методом Пирагаса

С.Т. Белякин¹, С.А. Шутеев¹, С.П. Кузнецов²

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
belyakin1962@mail.ru

В настоящей работе рассматривается автономная система, аттрактор Плыкина - Ньюхауса, которая характеризуется наличием гиперболичности. Изучается эволюция фазовых портретов в системе с гиперболическим аттрактором посредством обратной связи с постоянной временной задержкой [1].

Множество Λ называется гиперболическим аттрактором динамической системы, если Λ – замкнутое топологическое транзитивное гиперболическое множество и существует такая окрестность $U \supset \Lambda$, что $\Lambda = \bigcap_{t \geq 0} f^t U$. К хорошо известным гиперболическим системам относится аттрактор Плыкина. Гиперболический аттрактор Плыкина располагается на двумерной области $T = S^2$, где S^2 – единичная окружность. Тогда $f: T \rightarrow T$, $f(x, y, z) = (\cos \varphi \sin \phi, \sin \varphi \sin \phi, \cos \phi)$, где $k > 2$ и представляет собой подмножество $T \subset R^3$.

Система уравнений представлена в следующем виде [2]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \pi y \left(\frac{\sqrt{2}}{2} z + \frac{1}{2} \right) - \varepsilon xy^2, \\ \dot{y} &= -\sqrt{2} \pi zx - \frac{1}{2} \pi (x + z) + \varepsilon y (x^2 + z^2), \\ \dot{z} &= \pi y \left(\frac{\sqrt{2}}{2} x + \frac{1}{2} \right) - \varepsilon zy^2, \\ 1 &= x^2 + y^2 + z^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Применим преобразования для декартовых координат на сфере [3]:

$$\begin{aligned} W = X + iY &= \frac{x(1+z) + iy(1+x)}{(1+x)(1+z)}, \\ (x, y, z) &= \left(\frac{2X}{1+X^2+Y^2}, \frac{2Y}{1+X^2+Y^2}, \frac{1-X^2-Y^2}{1+X^2+Y^2} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Применим следующее преобразование и перейдем от декартовой системы координат к плоской. Используем метод Пирагаса для наблюдения эволюционной динамики аттрактора Плыкина - Ньюхауса с постоянной временной задержкой.

Донная система уравнений будет представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \frac{Y}{1+X^2+Y^2} \left(\frac{\pi}{4} [1 + \sqrt{2} - (\sqrt{2}-1)X^2 - (\sqrt{2}-1)Y^2] - \varepsilon Y \right), \\ \dot{Y} &= -\sqrt{2} 2\pi \frac{X(1-X^2-3Y^2)}{1+X^2+Y^2} - \frac{\pi}{2} \left(1 - 2X - X^2 + \frac{3}{2}Y^2 \right) + \varepsilon 2Y \left(1 - \frac{4Y^2(X^2+Y^2)}{(1+X^2+Y^2)^2} \right) + \\ &K(Y_{t-\tau} - Y_t). \end{aligned} \quad (3)$$

При использовании метода Пирагаса, при $K = 0.0 \rightarrow 0.4$, $\tau = 1.9$, $\varepsilon = 0.72$, наблюдается эволюционная динамика фазовых портретов для плоской (Y, X) системы координат, представленных в рис.1.

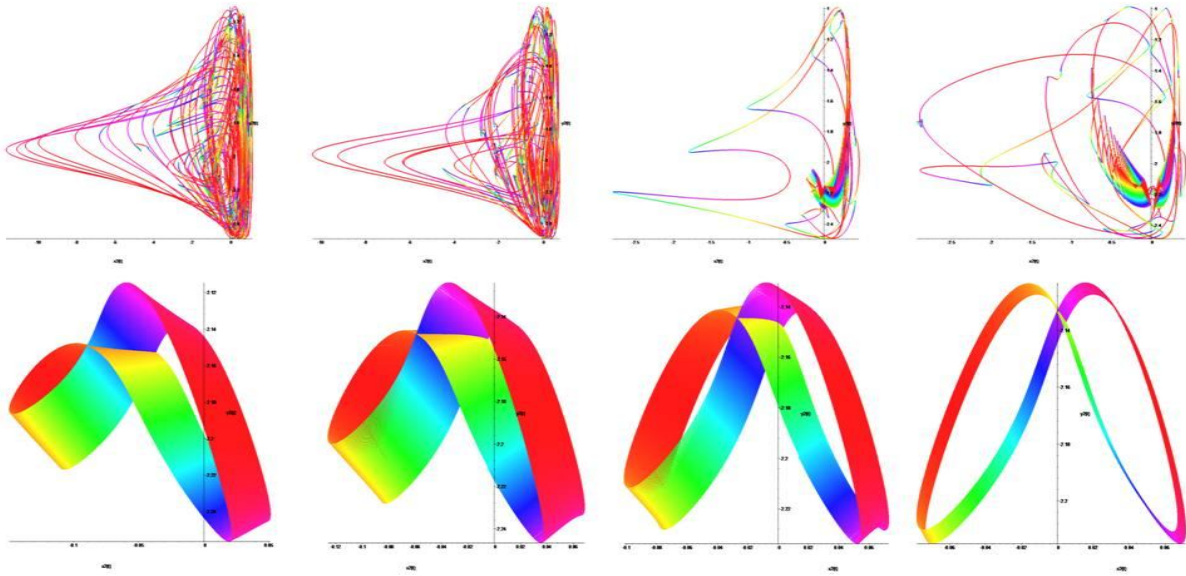


Рис. 1. Фазовые портреты $Y(X)$ аттрактора Плыкина - Ньюхауса при $K = 0.00 \rightarrow 0.40$, $\tau = 1.90$, $\varepsilon = 0.72$.

Проведем обратное преобразование $(Y, X) \rightarrow (x, y, z)$, представленными в рис.2.

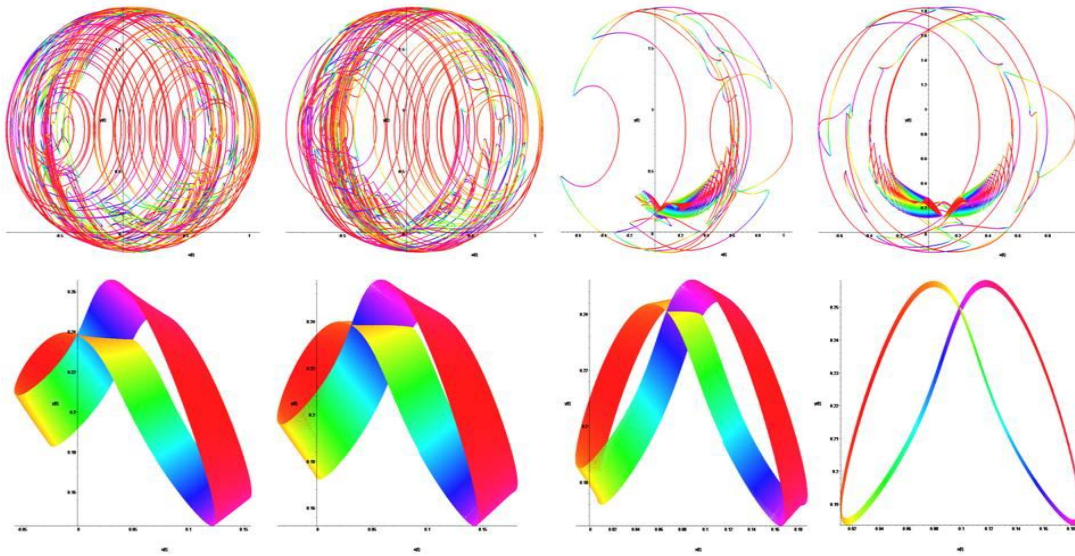


Рис. 2. Фазовые портреты $u(x)$ аттрактора Плыкина - Ньюхауса при $K = 0.00 \rightarrow 0.40$, $\tau = 1.90$, $\varepsilon = 0.72$.

Таким образом, применение метода Пирагаса при постоянной временной задержке, дает возможность наблюдать эволюционную динамику системы гиперболического аттрактора Плыкина - Ньюхауса.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Pyragas // Phys. Lett. A 170, 421, 1992.
2. S.P. Kuznetsov // Nonlinear dynamics 5: 403–424, 2009.
3. Y.L. Xiong et al. // Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics 7:1-8, 2012.

Экстремальные события на сигналах ЭЭГ грызунов с индуцированным инсультом

В.В. Грубов

Саратовский государственный университет имени Гагарина Ю.А.

vvgrubov@gmail.com

В настоящее время большой интерес для междисциплинарного научного сообщества представляет исследование неожиданных аномальных отклонений от нормального поведения в нелинейной динамической системе – так называемых экстремальных событий [1,2]. Такой интерес обусловлен большой важностью и экономической выгодой, которую дает предсказание экстремальных событий в реальных системах, например, волн-убийц в океане [3], падений на фондовой бирже [4] или, как будет показано в настоящей работе, патологических состояний головного мозга.

В динамической системе характерный временной масштаб определяется периодом малых колебаний динамической переменной в области некоторого среднего уровня [5,6]. В такой системе резкий переход в состояние, где динамическая переменная значительно превышает средний уровень, называется экстремальным событием [6].

Большое разнообразие экстремальных событий и механизмов их возникновения позволяет предположить существование подобных событий в живых системах, например, в активности головного мозга. В действительности, неожиданное и быстрое формирование приступов мигрени и эпилептических приступов, вызванное синхронизацией большого количества нейронов, демонстрирует динамику, близкую по свойствам к экстремальным событиям и перемежаемости [7].

Тем не менее, экстремальные события, генерируемые нейронами головного мозга, до сих пор не были рассмотрены детально с помощью анализа нейрофизиологических данных, в то время как в других направлениях изучения экстремальных событий анализ длинных временных рядов широко применяется. Различные подходы к анализу экстремальных событий в больших данных были применены при исследовании экосистем, климатических систем, динамики популяций и т.д., где анализ временных рядов позволил определить основные особенности наблюдаемых экстремальных событий и механизмы их возникновения. Более того, можно ожидать, что применение теории экстремальных событий для исследования патологической активности головного мозга совместно с традиционными средствами анализа ЭЭГ поможет улучшить методы ранней диагностики патологий головного мозга, например, эпилепсии [8].

В настоящей работе был рассмотрен особый вид экстремальных событий, возникающий в мозгу мышей, перенесших индуцированный инсульт. В работе были исследованы пять мышей линии CD-1, у которых искусственным образом был вызван инсульт головного мозга, а затем записаны сигналы ЭЭГ. Была проведена 24-часовая запись сигналов ЭЭГ, причем экстремальные события наблюдались в течение первых 2-3 часов после инсульта, затем состояние мозга приходило в норму. Частотно-временной анализ сигналов ЭЭГ показал, что экстремальные события проявляются в виде резкого повышения энергии колебаний в определенном частотном диапазоне.

Для частотно-временного анализа сигналов ЭЭГ был использован непрерывный вейвлетный анализ [9]. Для всего сигнала ЭЭГ $X(t)$ был рассчитан спектр вейвлетной энергии $M(f, t) = |E(f, t)|^2$ в частотном диапазоне $f \in [1, 30]$. Здесь $E(f, t)$ – комплексные вейвлетные коэффициенты, рассчитанные через свертку исследуемого сигнала $X(t)$ и набора базисных функций $\psi(f, t)$:

$$E(f, t) = \sqrt{f} \int_{t-4/f}^{t+4/f} X(t) \psi^*(f, t) dt \quad (1)$$

В данной работе в качестве материнского вейвлета был использован Морле-вейвлет.

Для каждой спектральной компоненты $f = f^*$ было рассмотрено нормированное значение вейвлетной энергии $W(f^*, t) = M(f^*, t)/M_{max}$, $W(f^*, t) \in [0, 1]$. Здесь M_{max} – максимальное значение вейвлетной энергии на всем диапазоне $f \in [1, 30]$. Распределение нормированной энергии $W(f^*, t)$ было рассмотрено отдельно для каждого животного и каждого значения частоты. На данных распределениях были выделены все максимумы и построены распределения амплитуд этих максимумов.

В ходе работы были построены функции распределения вероятности $F(W)$ в виде гистограмм в логарифмическом масштабе. Было обнаружено, что в области нормальной активности без экстремальных событий распределение $F(W)$ с высокой точностью аппроксимируется распределением Вейбулла:

$$F_W(W|_{a,b}) = \frac{b}{a} \left(\frac{W}{a}\right)^{b-1} \exp\left(-\left(\frac{W}{a}\right)^b\right) \quad (2)$$

В то же время, согласно теории экстремальных значений [10], хвосты на распределениях $F(W)$, когда W превышает пороговое значение W_δ , аппроксимируются обобщенным распределением Парето [11]:

$$F_{GPD}(W|_{k,\sigma,\theta}) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + k \frac{W-\theta}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}} \quad (3)$$

Пороговое значение W_δ определяется как значение W в точке пересечения кривых распределений Вейбулла и Парето.

Для оценки экстремального поведения в мозгу животных была введена специальная величина EEM :

$$EEM = \int_1^{W_\delta} |F(W) - F_W(W)| W dW \quad (4)$$

Значение данной величины близко к 0 в области нормальной динамики и возрастает в области экстремальных событий. Сравнение значений EEM для различных частот позволяет локализовать экстремальные события в определенной области частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Albeverio, V. Jentsch, H. Kantz. Extreme Events in Nature and Society. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
2. J.H. Wu, Q. Jia // Scientific Reports. 2016. V. 6. P. 21612.
3. D.I. Yeom, B.J. Eggleton // Nature. 2007. V. 450. P. 953.
4. P. Piccolia, M. Chaudhuryb, A. Souzaa // Research in International Business and Finance. 2017. V. 42. P. 275.
5. G. Nicolis, C. Nicolis. Foundations of Complex Systems: Emergence, Information, and Prediction. World Scientific, Singapore, 2012.
6. S. Coulibaly, M.G. Clerc, F. Selmi, S. Barbay // Phys. Rev. A. 2017. V. 95. P. 023816.
7. A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, I.S. Midzyanovskaya, E. Sitnikova, C.M. Rijn // Chaos. 2006. V. 16. P. 043111.
8. G. Luijtelaar van, A. Luttjohann, V.V. Makarov, V.A. Maksimenko, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov // Journal of Neuroscience Methods. 2016. V. 260. P. 144.
9. A.N. Pavlov, A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, Y.E. Sitnikova, V.A. Makarov, A.A. Ovchinnikov // Physics-Uspekhi. 2012. V. 55. P. 845.
10. J. Pickands III // The Annals of Statistics. 1975. V. 3. P. 119.
11. J.R. Hosking, J.R. Wallis // Technometrics. 1987. V. 29. P. 339.

Явление ассортативности в сетях с пространственно-распределенной топологией

Д.В. Кирсанов, В.В. Макаров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

dankirsdot@gmail.com

Пространственные ограничения физического мира это один из основных факторов, влияющих на формирование топологий многих сетевых структур. Например, взаимодействие в биологических системах, таких как популяции видов животных, сильно зависит от мест их обитания [1]. Топология городских сетей также прочно связаны с природой их возникновения [2]. В ряде случаев даже социальные сети демонстрируют зависимость от их пространственной конфигурации [3], не говоря уже о механизмах распространения болезней, которые напрямую зависят от физических контактов. В целом такие системы широко исследованы и есть достаточно четкое представление о принципах их пространственного роста [4]. Однако в таких биологических системах, как нейронные культуры, особенности пространственного распределения и его влияние на топологию изучены недостаточно. Способность этих систем поддерживать оптимальность своих связей уникальна [5]. Различные слои организации нейронных сетей головного мозга проявляют различные топологические масштабы и, соответственно, обладают различной степенью связности. Хорошо известно о существовании синоптических связей [6], объединяющих разные отделы мозга, но исследования также показывают, что, помимо этого типа связи, существует также медленное нейронное взаимодействие на коротких расстояниях [7], большую роль в формировании которого играют клетки астроцитов.

Приведенные факты свидетельствуют о важности выявления топологических свойств пространственно-распределенных сетей наряду с пониманием принципов их формирования. Следует отметить исследования, уже проведенные в этой области. В частности, много было уделено выявлению свойств пространственно-распределенных безмасштабных сетей (scale-free networks) [8]. Последние исследования показывают, что пространственно-распределенные сети не обязательно являются масштабно-инвариантными [9, 10]: социальные сети демонстрируют свойство малого мира с Пуассоновским распределением степеней узлов наряду с сетями аэропортов отдельных стран. В настоящей работе мы задаемся вопросом, как переход от связности на коротких дистанциях к безмасштабной структуре влияет на основные топологические свойства пространственно-распределенной сети, и исследуем свойство ассортативности во время этого перехода. В сети возможна ситуация, когда узлы, имеющие большую степень (хабы), преимущественно связаны с узлами, имеющими большую степень. Такие сети называют ассортативными. Возможна также обратная ситуация: хабы связаны с другими хабами через цепочки узлов, имеющих малое число соседей. Такие сети называют дисассортативными. Наш выбор исследуемой характеристики обусловлен ее сильной связью с устойчивостью сети.

Для проведения этого исследования была разработана численная модель, основанная на принципах пространственного роста и предпочтительного возникновения новых связей. В реальных пространственно-распределенных сетях, таких как городские системы или культуры нейронов, расположение узлов не случайно: вероятность появления новых узлов выше в непосредственной близости от уже существующих. Это условие выполняется в модифицированной коррелированной перколяционной модели (correlated percolation model) [4], которая предполагает, что вероятность возникновения нового узла j , зависит того, как заполнена его окрестность.

В то же время известно несколько моделей генерации пространственных масштабно-инвариантных сетей с использованием правила преимущественного присоединения. В разработанной модели были объединены два этих принципа, путем введения двух параметров: градиента плотности λ [4], определяющего уменьшение вероятности возникновения связи между узлами i и j с увеличением Евклидова расстояния, а также β - коэффициента степени, позволяющего уменьшить влияние градиента плотности при увеличении степени существующего узла i .

По итогам численного моделирования было выяснено, что топологический переход включает в себя процесс уменьшения ассортативности от высоких положительных значений для связности на коротких расстояниях до слегка отрицательных значений для масштабно-инвариантных структур. Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что появление дисассортативных связей наряду с ассортативными имеет важное значение для установления дальнедействующих связей в пространственных сетях. Полученные результаты согласуются с недавними экспериментальными исследованиями двумерных нейрональных культур [5], которые могут указывать на реальную природу наблюдаемых явлений. Обобщая результаты проведенных исследований, нами была показана сильная взаимосвязь между пространственной организацией сети и ее ассортативностью. Пространственно-распределенная сеть с сильными ограничениями на диапазон связности демонстрирует высокую степень ассортативности. Ассортативное поведение сетевых узлов связано с тем же в физическом пространстве: пространственные соседи имеют одинаковые степени. Этот тип структуры характеризуется степенным распределением Пуассона. Постепенное увеличение узлов с высокой степенью приводит к возникновению дальнедействующих соединений. Это позволяет хабам агрегировать связи не только с другими хабами, но и с периферийными узлами, что приводит к снижению ассортативности.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ в рамках поддержки ведущих научных школ (НШ-2737.2018.2) и молодых ученых-кандидатов наук (МК-5850.2018.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. M.A. Fortuna, C. Gomes-Rodriguez, J. Bascompte // *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*. 2006. V. 273. No 1592. P. 1429.
2. P. Crucitti, V. Latora, S. Porta // *Phys. Rev. E*. 2006. V. 73. No 3. P. 036125.
3. K. Sailer, I. McCulloh // *Social networks* 2012. V. 34. No 1. P. 47.
4. H.A. Makse et al. // *Phys. Rev. E*. 1998. V. 58. No 6. P. 7054.
5. D. de Santos-Sierra et al. // *PloS One*. 2014. V. 9. No 1. P. e85828.
6. E. Bullmore, O. Sporns // *Nature Reviews Neuroscience*. 2009. V. 10. No 3. P. 186.
7. S. Makovkin et al. // *Phys. Rev. E*. 2017. V. 96. No 5. P. 052214.
8. M. Barthelemy // *EPL (Europhysics Letters)*. 2003. V. 63. No 6. P. 915.
9. A. Jamakovic, S. Uhlig // *Networks and Heterogeneous Media*. 2008. V. 3. No 2. P. 345.
10. C. Herrmann, M. Barthelemy, P. Provero // *Phys. Rev. E*. 2003. V. 68. No 2. P. 026128.

Гиперболический хаос в связанных автоколебательных системах, функционирующих с возбуждением релаксационных автоколебаний

В.М. Дорошенко^{1,2}, В.П. Круглов³, С.П. Кузнецов^{3,4}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

²Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского

³Саратовский филиал института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

⁴Удмуртский государственный университет

kruglovyacheslav@gmail.com

Однородно гиперболические аттракторы — это особый класс аттракторов, для которых строго обоснована хаотическая динамика [1,2]. Одно из важнейших их свойств — грубость (или структурная устойчивость), то есть устройство аттрактора и характер динамики не чувствительны к малым изменениям параметров и функций, входящих в описывающие динамику уравнения.

Мы предлагаем две новых модели с аттрактором типа Смейла-Вильямса. Модели построены из двух связанных идентичных автоколебательных подсистем с периодически модулируемым управляющим параметром, так что основные частоты колебаний подсистем поочередно изменяются в целое число раз.

Первая модель представляет собой два одинаковых слабо связанных маятника Фруда [3], движение каждого из них по очереди периодически тормозится присоединением колодки, обеспечивающей гашение автоколебаний благодаря включению достаточно сильного вязкого трения. Уравнения системы выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - (a - bx^2)\dot{x} + \sin x &= \mu + \varepsilon(\dot{y} - \dot{x}) - d(t)\dot{x}, \\ \ddot{y} - (a - by^2)\dot{y} + \sin y &= \mu + \varepsilon(\dot{x} - \dot{y}) - d(t + T/2)\dot{y}, \end{aligned} \quad (1)$$
$$d(t) = \begin{cases} 0, & t < T_0, \\ D, & T_0 < t < T/2, \\ 0, & T/2 < t < T, \end{cases} \quad d(t+T) = d(t),$$

где a — управляющий параметр, ε — коэффициент связи, T — период модуляции.

Рассмотрим ситуацию, когда один маятник совершает автоколебания, а второй заторможен. Основная частота автоколебаний благодаря подбору параметров вдвое меньше, чем частота малых колебаний. Когда торможение второго маятника выключается, он начинает раскачиваться резонансным образом благодаря воздействию со стороны первого маятника на спектральной составляющей удвоенной частоты. Присутствие второй гармоники автоколебаний обеспечивается асимметрией потенциальной ямы осциллятора Фруда — наличием члена μ в правой части уравнения движения. Поэтому фаза этих колебаний отвечает удвоенной фазе основной составляющей колебаний первого маятника. В результате, когда возникшие колебания второго маятника приблизятся к установившемуся автоколебательному режиму с частотой вдвое меньшей, чем частота малых колебаний, фаза его будет удвоена в сравнении с начальной фазой первого маятника. Далее, процесс повторяется со сменой ролей одного и другого маятника раз за разом. Полный цикл, отвечающий периоду модуляции параметров T , сопровождается умножением исходной фазы колебательного процесса на фактор 4, т.е. для фазы реализуется четырехкратно растягивающее отображение окружности.

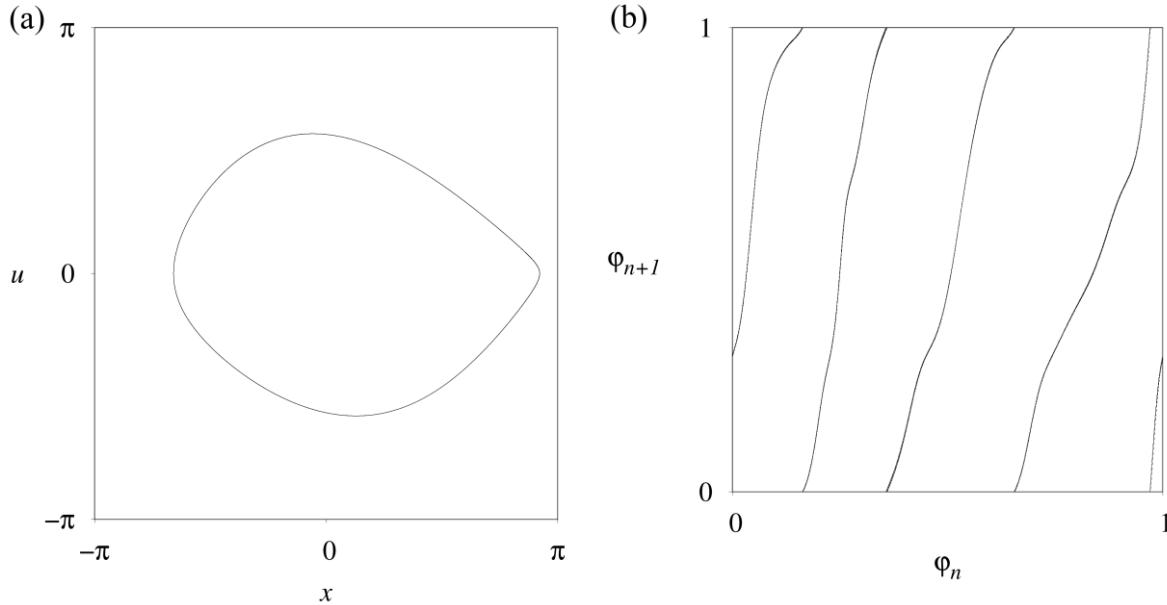


Рис. 1. (а) Портрет аттрактора отображения Пуанкаре за период модуляции в проекции на плоскость переменных первого маятника. (б) Итерационная диаграмма для фазы колебаний первого маятника.

Система уравнений (1) была решена численно. На рис. 1 (а) и (б) представлены портрет аттрактора отображения Пуанкаре за период модуляции в проекции на плоскость переменных первого маятника (x , $u = \dot{x}$) и итерационная диаграмма для фазы колебаний первого маятника при значениях параметров $a=0.36$, $b=0.16$, $\mu=0.087$, $\varepsilon=0.0003$, $D=0.8$, $T=250$, $T_0=T/4$. Итерационная диаграмма для фазы соответствует растягивающему отображению окружности с фактором 4.

При значениях параметров $a=0.36$, $b=0.16$, $\mu=0.087$, $\varepsilon=0.0003$, $D=0.8$, $T=250$, $T_0=T/4$ были вычислены показатели Ляпунова отображения Пуанкаре:

$$\Lambda_1 = 1.3 \pm 0.01, \quad \Lambda_2 = -11.78 \pm 0.04, \quad \Lambda_3 = -18.91 \pm 0.03, \quad \Lambda_4 = -41.46 \pm 0.05.$$

Старший показатель близок к $\ln 4$, показателю Ляпунова растягивающего отображения окружности. Остальные показатели отрицательные. Это соответствует построению соленоида Смейла-Вильямса с четырехкратным растяжением угловой переменной.

Вторая система состоит из двух одинаковых слабо связанных осцилляторов Бонхоффера – ван дер Поля [4,5], у которых управляющий параметр медленно изменяется во времени:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - (f(t/T + 1/4) - x^2) \dot{x} + x &= K + \varepsilon(y - x), \\ \ddot{y} - (f(t/T - 1/4) - y^2) \dot{y} + y &= K + \varepsilon(x - y), \\ f(\tau) &= \begin{cases} a, & 0 < \tau \leq \tau_1; \\ \frac{(a-c)\tau + c\tau_1 - a\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}, & \tau_1 < \tau \leq \tau_2; \\ \frac{(c-a)\tau + a\tau_2 - c}{\tau_2 - 1}, & \tau_2 < \tau \leq 1, \end{cases} \\ f(\tau + 1) &= f(\tau), \end{aligned} \quad (2)$$

где $f(\tau)$ – периодическая функция, описывающая модуляцию управляющего параметра, K – постоянная, ε — коэффициент связи.

С увеличением управляющего параметра осциллятора Бонхоффера – ван дер Поля основная частота автоколебаний уменьшается. Модулируя управляющий параметр,

можно получить периодическое переключение частоты подсистем с $\omega = 1$ для малых колебаний до $\omega = 1/M$ (M – целое) для колебаний с большой амплитудой.

Рассмотрим функционирование системы в режиме с гиперболическим аттрактором. Начнем с ситуации, когда один осциллятор совершает автоколебания, а второй заторможен. Основная частота автоколебания, благодаря упоминавшемуся выше подбору параметров, в $M = 2, 3, 4, \dots$ меньше, чем частота малых колебаний. Когда второй осциллятор в силу увеличения параметра приближается к порогу возбуждения и переходит его, он начинает раскачиваться резонансным образом благодаря воздействию со стороны первого осциллятора составляющей с частотой $\omega = 1$. Присутствие гармоник автоколебаний обеспечивается наличием членов $x^2\dot{x}$ и K в уравнениях. Поэтому фаза этих колебаний отвечает умноженной в M раз фазе основной составляющей колебаний первого осциллятора. В результате, когда возникшие колебания второго осциллятора приблизятся к установившемуся режиму релаксационных автоколебаний с частотой в M раз меньшей, чем частота малых колебаний, фаза его будет в M раз большей в сравнении с начальной фазой первого осциллятора. Далее, процесс повторяется со сменой ролей одного и другого осциллятора. Полный цикл, отвечающий периоду модуляции параметров T , сопровождается умножением исходной фазы колебательного процесса на фактор $M^2 = 4, 9, 16, \dots$, т.е. для нее реализуется растягивающее отображение окружности. При сжатии по остальным направлениям это соответствует построению соленоида Смейла-Вильямса. В отображении, построенном за полпериода модуляции $T/2$, фаза умножается на M .

Система уравнений (2) была решена численно. На рис. 2 (а) и (б) изображены портрет аттрактора отображения Пуанкаре за период модуляции в проекции на плоскость переменных первого осциллятора ($x, u = \dot{x}$) и итерационная диаграмма для фазы колебаний первого осциллятора при значениях параметров $a=5.49$, $K=0.5$, $c=-2$, $\varepsilon=0.01$, $T=200$, $\tau_1=0.4$, $\tau_2=0.5$. Итерационная диаграмма для фазы соответствует растягивающему отображению окружности с фактором 4.

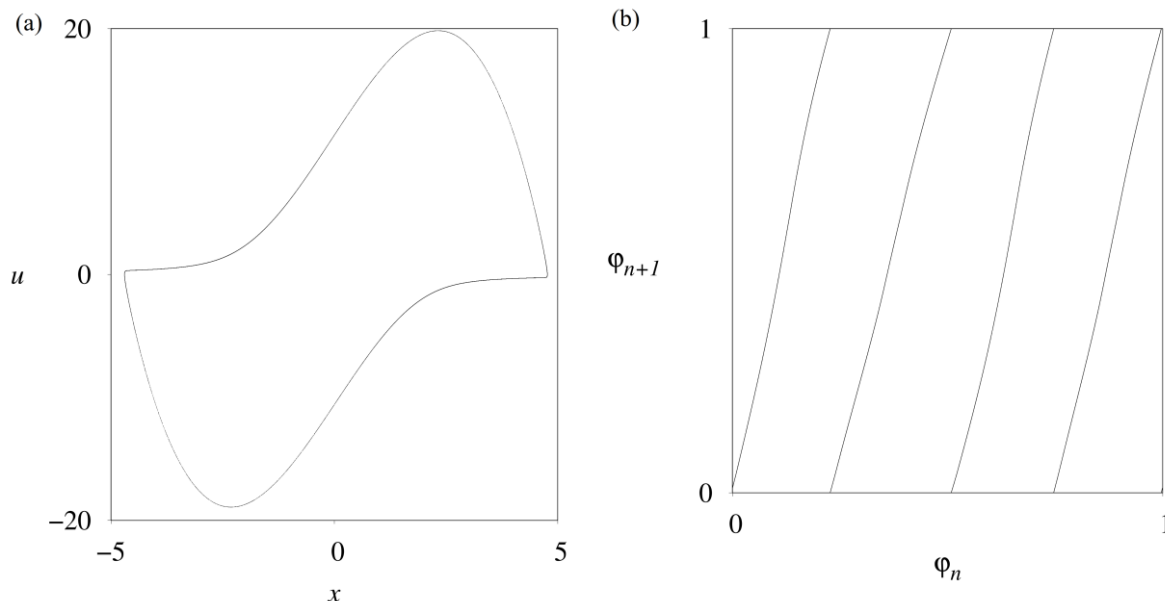


Рис. 2. (а) Портрет аттрактора отображения Пуанкаре за период модуляции в проекции на плоскость переменных первого осциллятора. (б) Итерационная диаграмма для фазы колебаний первого осциллятора.

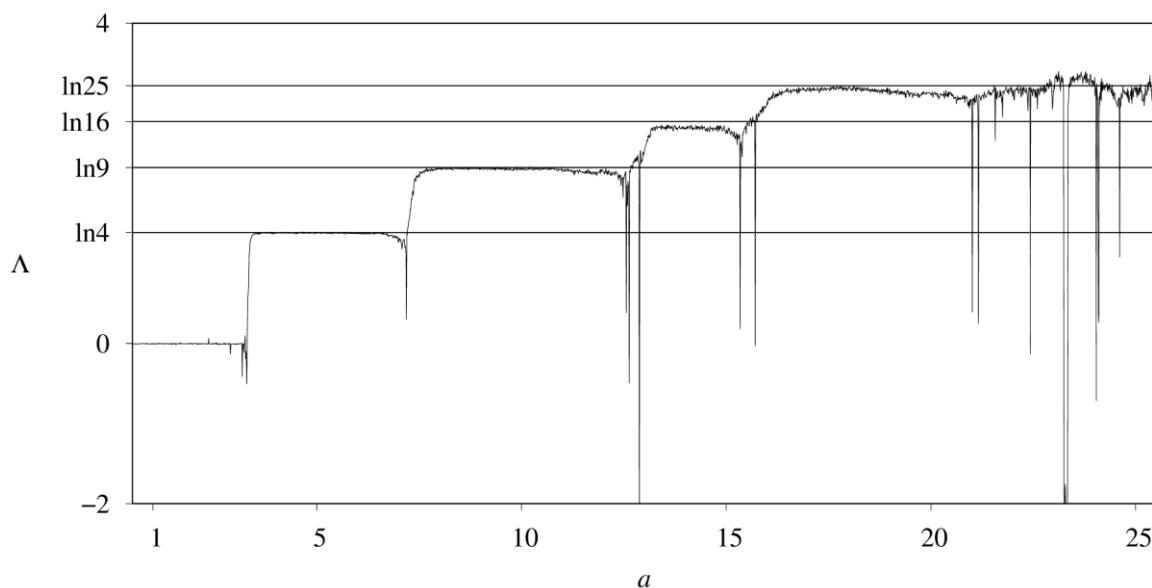


Рис. 3. Зависимость старшего показателя Ляпунова стробоскопического отображения за период модуляции при $a=5.49$, $K=0.5$, $c=-2$, $\varepsilon=0.01$, $T=400$, $\tau_1=0.4$, $\tau_2=0.5$.

При значениях параметров $a=5.49$, $K=0.5$, $c=-2$, $\varepsilon=0.01$, $T=200$, $\tau_1=0.4$, $\tau_2=0.5$ были вычислены показатели Ляпунова отображения Пуанкаре:

$$\Lambda_1 = 1.3791 \pm 0.004, \quad \Lambda_2 = -34.45 \pm 0.07, \quad \Lambda_3 = -396.3 \pm 0.2, \quad \Lambda_4 = -1604.7 \pm 0.3.$$

Старший показатель близок к $\ln 4$, показателю Ляпунова растягивающего отображения окружности. Остальные показатели отрицательные.

Подбором параметров можно реализовать режимы с различными факторами растяжения угловой переменной. На рис. 3 представлена зависимость старшего показателя Ляпунова от управляющего параметра a для отображения за период модуляции. При различных значениях параметра a возникают соленоиды Смейла-Вильямса с факторами $M^2 = 4, 9, 16, 25$. При этом старший показатель Ляпунова зависит от параметра плавно в широких интервалах, что говорит о структурной устойчивости аттракторов.

Система на основе маятников Фруда исследована при поддержке гранта РФФ №15-12-20035. Система на основе осцилляторов Бонхоффера – ван дер Поля исследована при поддержке гранта РФФ №17-12-01008.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Б. Каток, Б. Хасселблат “Введение в современную теорию динамических систем” Москва: Факториал, 1999.
2. С.П. Кузнецов “Динамический хаос и гиперболические аттракторы: от математики к физике” Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013.
3. С.П. Стрелков // ЖТФ. 1933. Т. 3. № 4. С. 563-573.
4. R. FitzHugh // Biophysical J. 1961. V. 1. No. 6. P. 445-466.
5. J. Nagumo et al. // Proc IRE. 1962 . V. 50. No. 10. P. 2061–2070.

Нелинейная динамика, почти-периодическое суммирование, автоколебательные процессы, информационное кодирование в избирательных импульсных нейронных сетях

М.Е. Мазуров

Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова
mazurov37@mail.ru

Нелинейная динамика электрических процессов и переработки информации в избирательных импульсных нейронах (ИН) и искусственных нейронных сетях (ИНС) на их основе наиболее близка к реальным биологическим процессам в реальном биологическом нейроне и нейронных сетях. Однако, динамика процессов в ИН и ИНС, механизмы переработки информации изучены недостаточно. Большинство приложений решаются с помощью ИНС с нейронами МакКаллока-Питтса, в которых используются бинарные входные сигналы. Основные операции, выполняемые в бинарных ИНС: суммирование входных сигналов с определенными весами в нейронах МакКаллока-Питтса, кластеризация и суммирование входных сигналов в избирательных нейронах, обработка нелинейным элементом в нейронах МакКаллока-Питтса, и генерирование автоколебаний в виде одиночного импульса или серии импульсов в импульсном нейроне или избирательном нейроне. Одновременно во всех ИНС реализуется переработка входной информации, реализуемая в специфическом кодировании, сжатии информации с минимальными информационными потерями.

Следует отметить две существенные особенности импульсных нейронов: 1) суммирование входных импульсных последовательностей в ИН принципиально отличается от суммирования бинарных последовательностей в бинарных нейронах; 2) нелинейная часть ИН является импульсной автоколебательной системой. Эта система может быть потенциально автоколебательной и генерировать в ответ на входной импульс один ответный импульс на выходе. Возможна генерация периодической последовательности импульсов или пачек импульсов (берст). Физический смысл динамики электрических процессов в нейроне, как информационной системы, выполняющей сложную динамическую обработку информации, изучен недостаточно.

Избирательные нейроны и нейронные сети

В известных нейронных сетях используются искусственные нейроны МакКаллока-Питтса, в которых обучение достигается за счет подбора весовых коэффициентов. Однако реальные нейронные сети не содержат весовых коэффициентов. К тому же расчет весовых коэффициентов, реализуемый с помощью итерационных процедур, является достаточно сложным. В данной работе мы используем избирательные нейроны и избирательные нейронные сети, описанные в работе [1] и патентах [2-5]. В избирательных нейронах и избирательных нейронных сетях избирательность достигается не за счет подбора весовых коэффициентов, как в известных нейронных сетях, а за счет избирательной кластеризации каналов связи в нейронах – дендритах по информационным свойствам входных сигналов, то есть кластеризация обеспечивается за счет подстройки по кодовым последовательностям входных сигналов. Избирательный нейрон, предложенный в работах [2-5], показан на рис. 1 справа, для сравнения на рис. 1 слева показана известная модель нейрона МакКаллока-Питтса.

Избирательная нейронная сеть показана на рис. 2 справа, для сравнения на рис. 2 слева показана известная модель перцептрона Розенблюта, использующая нейроны МакКаллока-Питтса.

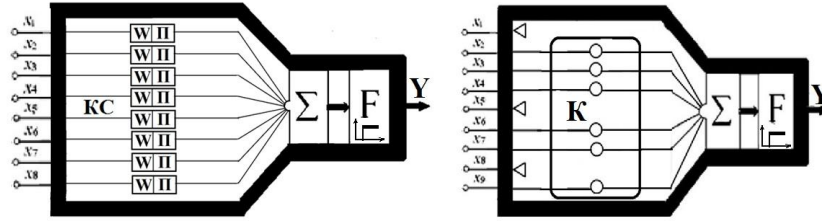


Рис. 1. Структура математических моделей нейронов. Слева – нейрон МакКаллока-Питтса, справа – избирательный нейрон. На рисунке приняты обозначения: $x = (x_1, \dots, x_n)$, КС – каналы связи-дендриты, Σ – сумматор, F – нелинейная пороговая функция в нейроне МакКаллока-Питтса и релаксационная автоколебательная система в избирательном импульсном нейроне, К – кластер каналов связи в избирательном нейроне. Некоторые входные сигналы заблокированы при образовании каналов связи.

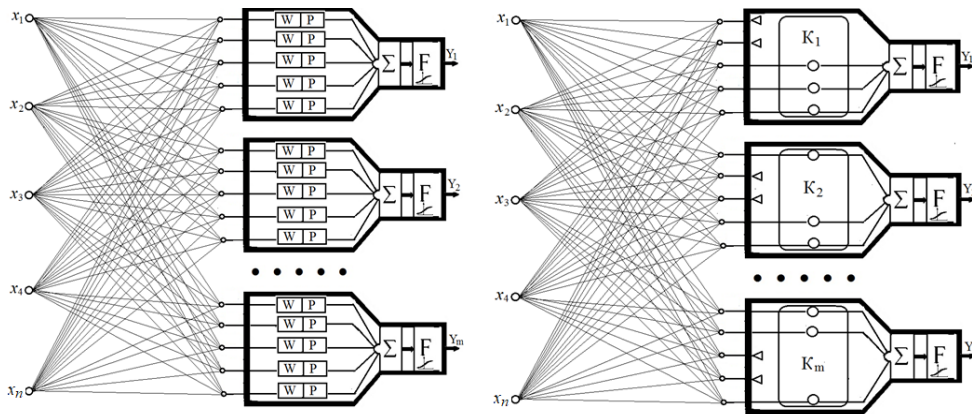


Рис. 2. Избирательная нейронная сеть показана на рис. 2 справа, для сравнения на рис. 2 слева показана известная модель перцептрона Розенблота, использующая нейроны МакКаллока-Питтса. Количество нейронов в однослойных перцептронах слева и справа равно m .

Доказана теорема об условиях единственности распознавания нескольких контурных входных объектов с помощью избирательного однослойного перцептрона.

Суммирование импульсных последовательностей

Специфика суммирования состоит в том, что для последовательностей из коротких импульсов с различными периодами временное положение импульсов может не совпадать, и тогда их амплитуды не суммируются. Например, даже для двух импульсных последовательностей с одинаковыми периодами следования, но сдвинутых по фазе, суммирование амплитуд не происходит. В общем случае сумма разно периодических импульсных последовательностей является равномерной почти-периодической функцией, и их суммирование происходит на основе свойств почти-периодических функций (ППФ). Согласно теореме Кронекера такая функция имеет сгущения и разрежения импульсов, следующие с интервалами так называемых ε -почти-периодов.

Известно, что для возбуждения нейрона необходимо, чтобы сумма импульсов, пришедших по дендритам, превышала порог возбуждения. Специфическое свойство почти-периодических функций - существование ε -почти-периодов и максимальной суммы импульсов, повторяющейся через ε -почти-период, - позволяет осуществить избирательную обработку информации, закодированной в импульсных потоках, и сократить избыточность входной информации. Рассмотрим иллюстрацию ε -почти-периодов. Сигналы на входах и на выходах нейронов можно представить в виде суммы почти-периодических функций, как показано на рис. 3 слева, суммарный импульсный поток показан выше оси времени на рис. 3 справа.

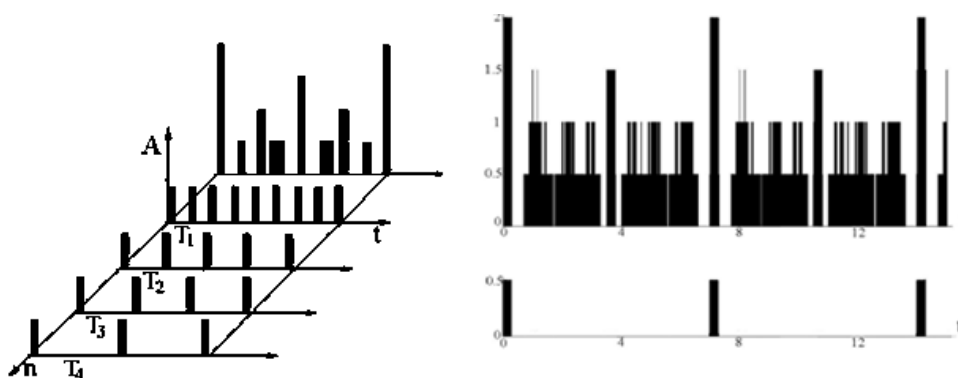


Рис. 3. Схематическое изображение суммирования 4-х последовательностей электрических импульсов нейрона в виде прямоугольных импульсов слева. Справа показано суммирование в координатах: время, амплитуда. Видно образование \mathcal{E} - почти-периодов, равных 7.

Нелинейный отклик релаксационной автоколебательной системы ИН

Нелинейная часть ИН является импульсной автоколебательной системой. Эта система может быть потенциально автоколебательной и генерировать в ответ на входной импульс один ответный импульс на выходе. Возможна генерация периодической последовательности импульсов или пачек импульсов (берст). При этом серии импульсов в пачке обычно имеют убывающий период, но могут иметь примерно одинаковый период следования, или даже хаотическую динамику. Виды ответов нелинейной динамической системы на входные импульсы воздействия иллюстрируются рис. 4.

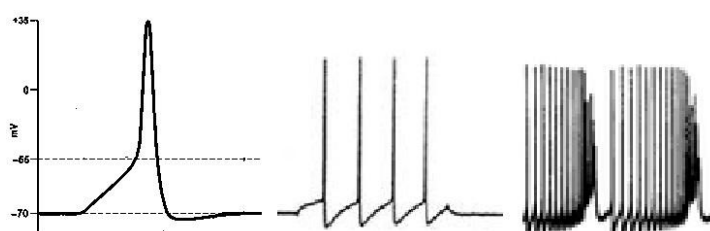


Рис. 4. Виды ответов нелинейной автоколебательной системы импульсного нейрона.

Кодирование информации инвариантной относительной интенсивности входного воздействия

Известны следующие методы кодирования информации в ИН: 1) фазовый (временной) задается точным положением импульсов во времени (относительно какого-либо общего опорного; 2) временем до появления первого импульса - информация о сигнале задается временем появления первого импульса на каком-либо выходе; 3) порядковый задается порядком получения импульсов на выходах сети; 4) интервальный (задержковый) - информация о сигнале задается расстоянием между импульсами, получаемыми на выходах сети; и другие.

Помимо этого, существуют виды представления информации, являющиеся смешанной формой нескольких простых видов представления информации.

В данной работе определяется следующий способ кодирования информации в ИН. Единицей информации считается импульсная последовательность. Для бинарных нейронов МакКаллока-Питтса для сравнения единицей информации является один пиксель изображения на экране монитора. Таким образом, входной объект определяется кластером импульсных последовательностей, генерируемых входным объектом, например изображением на экране монитора. Операция суммирования входных сигналов реализуется за счет суммирования импульсных

последовательностей, благодаря использованию свойств почти-периодических функций.

Иллюстрация известных видов кодирования в ИН показана на рис. 5.

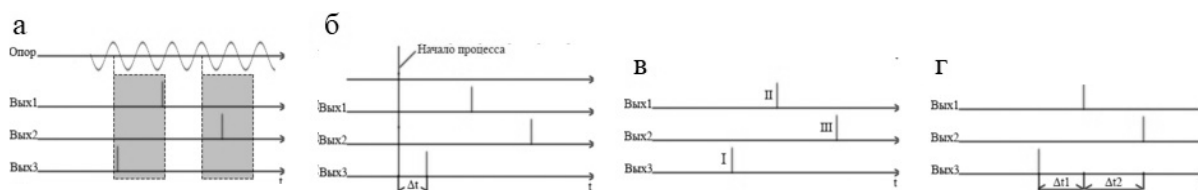


Рис. 5. Иллюстрация известных видов кодирования в ИН.

Принципиальным является следующий вопрос: сохранится ли правильность распознавания при увеличении интенсивности входного сигнала, вызывающего изменения частоты импульсных последовательностей, идущих от объекта. При этом естественно допустить, что все частоты импульсных последовательностей изменяются синхронно при изменении интенсивности. Изменение частоты стимулов от их интенсивности описывается уравнением Фехнера

$$\frac{f}{f_0} = \ln \frac{I}{I_0}, \quad \frac{T}{T_0} = 1 / \ln \frac{I}{I_0},$$

где I, f - интенсивность импульса и соответствующая частота; I_0, f_0 - их начальные значения. Можно доказать использование неравенства Кронекера теории ППФ, что распознавание является топологически инвариантным относительно интенсивности входного сигнала. Поэтому полностью сохраняется базовое свойство безынерционного суммирования максимальных значений импульсных последовательностей. Сам процесс распознавания остается инвариантным относительно изменения интенсивности входного сигнала.

Как изменяется динамика процесса распознавания при изменении интенсивности входного сигнала. Процесс распознавания не нарушается, но частота следования импульсов на выходе регистрирующего нейрона или пула нейронов увеличивается пропорционально изменению интенсивности входного сигнала. Экспериментально это обстоятельство подтверждается экспериментальными исследованиями нейронной активности определенных участков головного мозга при его «просветлении». При увеличении интенсивности входного сигнала частота импульсной активности исследуемого участка головного мозга изменяется пропорционально изменению интенсивности входного сигнала. Рассмотренная в работе модель функционирования импульсных нейронных сетей требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Е. Мазуров // Изв. РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 1. С. 83-87
2. М.Е. Мазуров Импульсный нейрон, близкий к реальному. Патент на изобретение № 2598298. 09.02.2015.
3. М.Е. Мазуров Нейрон, моделирующий свойства реального нейрона. Патент на изобретение № 2597495. 07.11.2014.
4. М.Е. Мазуров Однослойный перцептрон на основе избирательных нейронов. Патент на изобретение № 2597497 13.01.2015.
5. М.Е. Мазуров Однослойный перцептрон, моделирующий свойства реального перцептрона. Патент на изобретение № 2597496. 24.02.2015.

Торнадо – автоколебательная система в активной среде, генерирующая вогнутые спиральные автоволны и атмосферные вихри

М.Е. Мазуров

Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова
mazurov37@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Смерч, который называют также торнадо, - природное явление огромной разрушительной силы - таинственное и загадочное. Обычно считают, что торнадо – атмосферное явление - вихрь образуется во время грозы, [1-3].

КЛАССИФИКАЦИЯ ТОРНАДО

Естественной представляется классификация по субстрату, из которого состоит торнадо. По субстрату вихря можно выделить следующие типы торнадо: 1) атмосферные – воздушные; 2) электрические; 3) огненные; 4) пылевые; 5) жидкостные – водяные; 6) снежные и другие. Различные по субстрату торнадо показаны на рис. 1.

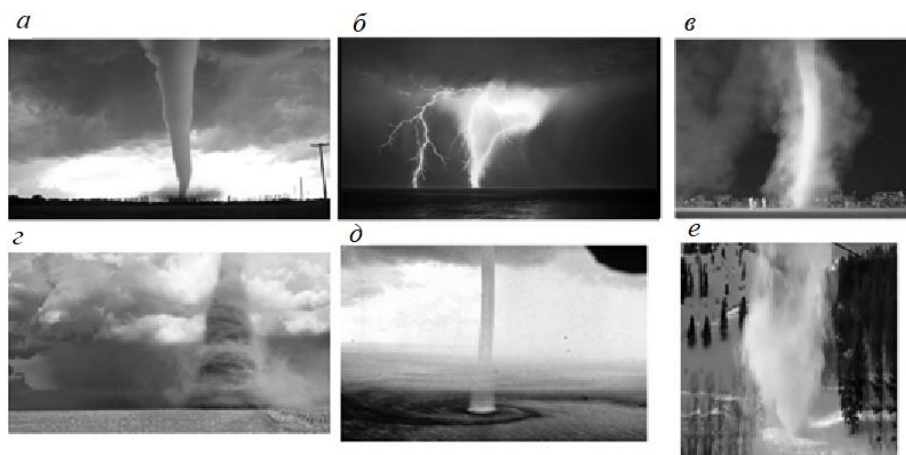


Рис. 1. Торнадо различные по субстрату: а) атмосферные – воздушные; б) электрические; в) огненные; г) пылевые; д) жидкостные – водяные; е) снежные.

Возможна классификация атмосферных торнадо по форме: 1) бичеподобные, тонкие; 2) колоннообразные; 3) бочкообразные, лохматые; 4) составные, когда около одной воронки торнадо вращаются ещё несколько дополнительных, Торнадо можно создавать искусственно. Поэтому искусственные торнадо будем считать специфическим классом, который более подробно рассмотрим в дальнейшем. Этот класс позволяет наглядно представить механизм возникновения и свойства торнадо.

ИЗВЕСТНЫЕ ТЕОРИИ ТОРНАДО

Перечислим некоторые известные теории торнадо. 1). Теория самоорганизации. 2). Теория возмущенных участков атмосферы, в которых градиенты электрического поля достигают критических значений; 3). Теория разделения электрических зарядов. Установлено, что возникновение торнадо находится в прямой зависимости от развития значительных по мощности грозовых процессов; 4). Теория возникновения множества внутренних молний. Обсуждение молниеобразования и его возможная связь с торнадообразованием; 5). Теория мезомасштабной турбулентности. [3]. Получена 3D визуализация топологически эквивалентная одной из форм торнадо. 6). Газодинамическая структура смерча В.С. Политова [4]. Имеется ряд работ по исследованию закрученных вихрей и их приложений.

МОДЕЛЬ ТОРНАДО КАК САМООРГАНИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЫ

Рассмотрим следующее определение торнадо. Определение. Торнадо – структура, возникающая в неоднородной активной среде, в которой возбужденные автоколебательные вогнутые спиральные автоволны, переносящие энергию, возбуждают вихри, уходящие в окружающую среду. Можно сказать, что атмосферное торнадо – автоколебательная система в активной среде грозового облака, генерирующая периодические вогнутые спиральные автоволны, переносящие энергию (ВСАПЭ) и создающие крупномасштабные атмосферные вихри. Структурная схема торнадо согласно предлагаемой модели показана на рис. 2.

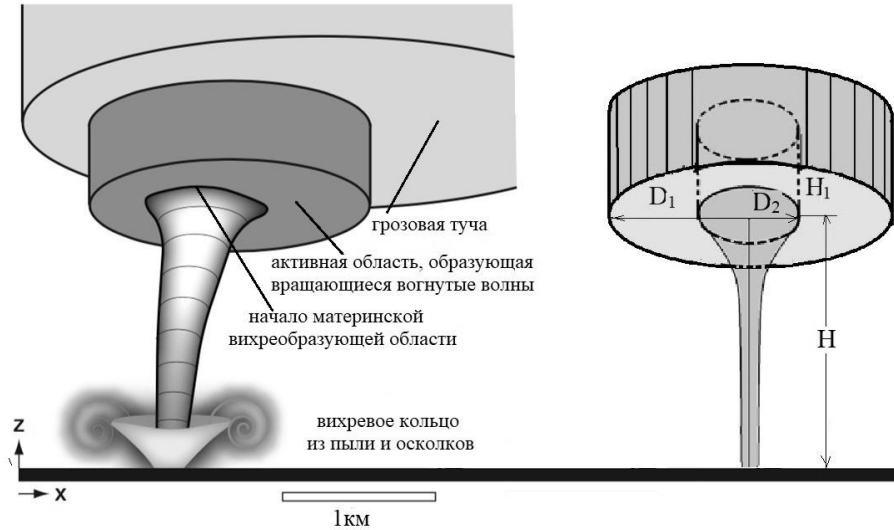


Рис. 2. Структурная схема торнадо. Вид на торнадо и грозовое облако снизу. Справа на схематической структуре D_1 - диаметр активной среды, D_2 , H_1 - диаметр и высота материнской области, где образуется вихрь, H - высота от земли до грозового облака.

Согласно определению структуры торнадо, приведенному выше, специфические свойства торнадо определяются активной средой – грозовым облаком и субстратом создаваемого вихря.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТОРНАДО

Для описания активной среды принято использовать системы нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} = F_i(E_1, \dots, E_n) + D_i \Delta E_i \quad (i = 1, \dots, n), \quad (1)$$

где E_i - переменные, F_i - нелинейные функции, D_i - коэффициенты диффузии, $\Delta E_i = \frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2}$. В качестве модели активной среды в вычислительном эксперименте были использованы уравнения Фитцхью-Нагумо [5].

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1 - \frac{x_1^3}{3} - x_2 + I + D_1 \Delta x_1; \quad \frac{dx_2}{dt} = \varepsilon(a - x_1 + b x_2) + D_2 \Delta x_2 \quad (2)$$

где I - ток смещения, a, b, ε - параметры: $a = 0.7, b = 0.8, I = 0.142$, D_1, D_2 - коэффициенты диффузии.

Вихревая воронка торнадо в математической модели торнадо создается за счет ВСАПЭ, которые возбуждают вихревые движения воздуха и образование воронки торнадо. Для математического описания образования вихревой воронки торнадо в дальнейшем используем уравнения Навье – Стокса. В векторном виде для несжимаемой жидкости они записываются следующим образом [6]

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nu \Delta \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f}, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

где $\mathbf{v} = (v^1, \dots, v^n)$ - векторное поле скоростей, p - давление, ∇ - оператор Гамильтона, Δ - оператор Лапласа, ν - коэффициент кинематической вязкости, ρ - плотность, \mathbf{f} - векторное поле массовых сил. В систему уравнений Навье - Стокса добавлены краевые и начальные условия

$$\mathbf{v}|_{\partial\Omega} = 0, \quad \mathbf{v}|_{t=0} = \mathbf{v}_0.$$

Расчет вихревых решений уравнений Навье – Стокса производится в круговой области, которой аппроксимируется материнская область вихря. При численном моделировании производится сшивание решений в активной среде и на границе круговой области.

Начальные условия для возникновения круговых автоволн в активной среде обсуждались в работе [7], посвященной их возникновению в предсердиях человека. Начальные условия для возникновения круговых автоволн имеют много общего для активных сред различных типов.

ВОГНУТЫЕ СПИРАЛЬНЫЕ АВТОВОЛНЫ, ПЕРЕНОСЯЩИЕ ЭНЕРГИЮ

Образование вогнутой спиральной автоволны, переносящей энергию, в неоднородной двумерной области описано в работах [8,9]. Для конкретной реализации ВСАПЭ была использована неоднородная круговая область, разбитая на кольца. В качестве активной среды для генерации ВСАПЭ была использована система из двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, а именно уравнения ФитцХью-Нагумо. Параметры уравнения (2) в каждом кольце подбирались таким образом, чтобы обеспечить необходимую для образования вогнутой автоволны скорость распространения в каждом кольце. Приводим результаты вычислительного эксперимента по созданию вогнутой волны с помощью уравнений ФитцХью-Нагумо (2). Вогнутая автоволна показана на рис. 3.

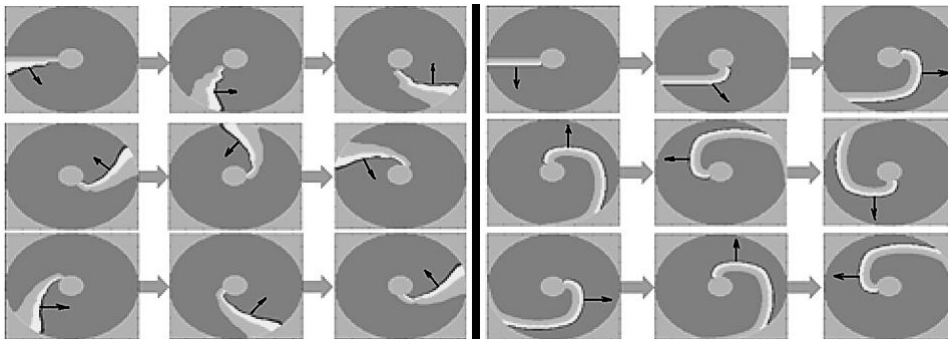


Рис. 3. Вогнутая автоволна в модели ФитцХью – Нагумо показана слева. Для сравнения выпуклая автоволна, в однородной круговой области, распространяющаяся из центра области, показана справа.

Если считать периферическую область ядром вогнутой спиральной автоволны, переносящей энергию, то вогнутые спиральные автоволны, переносящие энергию, можно рассматривать как внутриядерные волны.

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ВИХРЬ

Сжатие вихря к оси обусловлено воздействием вогнутых спиральных автоволн, переносящих энергию (ВСАПЭ), стремящихся уплотнить вогнутые волны к центру автоколебательной активной материальной среды облака. Ввиду возникновения неустойчивости рождается вихревое движение, выбрасываемое вертикально вниз к поверхности земли. Торнадо - это часть грозового облака, которая имеет быстрое вращение вокруг вертикальной оси за счет образования ВСАПЭ. Сначала вращение видно только в самом облаке, затем часть его отвисает вниз в виде воронки, которая постепенно удлиняется и, наконец, соединяется с землей.

КОНСТРУИРОВАНИЕ СМЕРЧА – ТОРНАДО НА ОСНОВЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДЕЛИ

Понимание механизмов функционирования предлагаемой модели позволяет создавать торнадо по заданному плану, из заданных элементов структуры. В качестве активной среды - материнской субстанции могут использоваться вращающиеся механические системы: диски, круги с лопатками, механически закрученные воздушные потоки. Известно моделирование и исследование огненных торнадо.

Торнадо может быть сконструирован в стакане с водой, молоком, кофе с помощью закручивания поверхностного слоя жидкости, что приводит к образованию воронки торнадо. В зависимости от скорости вращения можно получить торнадо с различной длиной воронки. Чем выше скорость вращения, тем длиннее воронка, что иллюстрируется рис. 4.



Рис. 4. Образование торнадо в воде при использовании вместо активной среды закрутки поверхностного слоя пластинкой с лопастями. Наибольшая скорость вращения на рис. 4 справа, наименьшая – слева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.В. Наливкин “Ураганы, бури, смерчи”. М.: Наука, 1969. 487 с.
2. А.Ю. Варакин, М.Э. Ромаш, В.Н. Копейцев “Торнадо”. М.: Физматлит. 2011.
3. С.А. Арсеньев, А.Ю. Губарь, В.Н. Николаевский//ДАН, 2004. т.396, № 4, С.541-546.
4. В.С. Политов. // Челябинск, Миасс, КБМ им. академика Макеева В.П., 1992. С. 259-270.
5. R.A. FitzHugh // Biophys. J. 1961. V. 1 P. 445
6. Р. Темам “Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ. 2-е изд.” М.: Мир, 1981.
7. М.Е. Мазуров, И.М. Калюжный // Вестник МГУ. Серия: Физика, Астрономия. 2014. № 3. С. 45-49.
8. М.Е. Мазуров. // Изв. РАН. Серия физическая. 2018. том 82. № 1. С. 72–77.
9. М.Е. Мазуров // Изв. РАН. Серия физическая. 2018. том 82. № 1. С. 83-87.

Частотно-временные характеристики ЭЭГ во время просмотра образовательного материала

В.В. Макаров, Н.С. Фролов

*Научно-образовательный центр «Системы Искусственного Интеллекта и Нейротехнологии»
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*

vladmak404@gmail.com

В настоящее время одним из основных направлений развития нейронауки становится понимание механизмов обработки информации и установления функциональных связей в головном мозге в процессе когнитивной деятельности [1]. В частности, одним из наименее изученных процессов при этом выступает обучение и приобретение новых навыков [2]. В этом контексте можно отметить работы, связанные с анализом динамики мозга при решении логических задач [3] и освоении моторных навыков, в том числе, в контексте реабилитации [4, 5]. Большой интерес представляет ряд исследований того, как меняется функциональная сеть головного мозга в процессе обработки как визуальной [6] и аудиальной информации [7].

Несмотря на общий рост числа научных работ, посвященных упомянутой тематике, на данный момент отсутствуют комплексные исследования нейронной сети головного мозга в процессе обучения, учитывающие взаимодействие с преподавателем, а также процессы, происходящие при групповом обучении. Стоит отметить, что общение с преподавателем, а также взаимодействие между учениками при обучении в группе могут существенно влиять на реализующиеся частотные характеристики электрической активности мозга испытуемых [8]. В частности, показано, что процесс обучения в группе сопровождается появлением эффектов коллективного взаимодействия, таких как реализация синхронизации между различными ритмами ЭЭГ студентов и преподавателя [9].

В данном контексте актуальной задачей, лежащей на стыке современной нейронауки, радиофизики и нелинейной динамики, является изучение синхронизации и взаимосвязи между различными областями нейронной сети головного мозга при обработке и усвоении новой информации [10].

Стоит отметить, что данная задача также имеет больше практическое значение. В связи с развитием и миниатюризацией современной аппаратуры для регистрации сигналов электрической активной головного мозга [11], все более востребованными становятся методы автоматического выделения характерных частотно-временных паттернов на сигналах ЭЭГ. Это в первую очередь связано с возможностью создания интерфейсов мозг-компьютер (brain-computer interface) для мониторинга и контроля состояний мозга [12]. В этом ключе, разработка автоматических методов выделения паттернов когнитивной деятельности, соответствующих эффективному усвоению новой информации, представляет огромный интерес и может быть использована в широком круге прикладных задач, таких как экспресс-переподготовка и обучение языкам [13]. Важнейшим элементом таких методов является точность распознавания характерных паттернов электрической активности [14], что может быть достигнуто с помощью использования методов спектрального анализа и технологий искусственного интеллекта [15]. В тоже время, создание интерфейса мозг-компьютер предполагает обработку многоканальных записей ЭЭГ в режиме реального времени, что требует эффективного распределения вычислительных мощностей и использования современных технологий параллельных вычислений [16].

В ходе настоящего исследования был изучен частотно-временной состав электроэнцефалограммы (ЭЭГ) испытуемых в процессе восприятия образовательного материала. Образовательный материал подавался в виде коротких видео в стиле скрайбинг, содержащих новую для испытуемых информацию. После каждого видео испытуемому предлагалось ответить на ряд контрольных вопросов для оценки их вовлеченности в процесс восприятия информации. Регистрация ЭЭГ производилась в расширенной расстановке электродов 10-20, что позволило получить хорошее пространственное разрешение по всей поверхности головы. Частотно-временной анализ производился с помощью вейвлетного преобразования, имеющего вид

$$w(\omega, t) = \sqrt{\omega} \int_{t-4/\omega}^{t+4/\omega} X(t') \psi^*(\omega(t-t')) dt', \quad (1)$$

где ω соответствует частотам, по которым происходит разложение анализируемого сигнала, $\psi^*(t-t')$ - материнский вейвлет, символ (*) обозначает комплексное сопряжение. В качестве материнской функции используется вейвлет Морле. Для ускорения расчетов, алгоритм вычисления вейвлетного преобразования был реализован с использованием технологии параллельного программирования CUDA для одновременной обработки каждого временного отсчета сигнала при оффлайн-анализе.

В ходе анализа были выявлены основные отличия спектральных характеристик ЭЭГ в процессе восприятия образовательного материала от фоновой активности, определены основные закономерности, связанные с распределением энергии по альфа-, бета- и дельта-диапазонам. Также, проведено сопоставление спектрального состава ЭЭГ в процессе просмотра нейтрального видео и образовательного материала, выделены характерные отличия в динамике бета-ритма в лобных и затылочных долях.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ в рамках поддержки ведущих научных школ (НШ-2737.2018.2) и молодых ученых-кандидатов наук (МК-5850.2018.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Yongmin // *Front Neurosci.* 2014. V.8.
2. J.F. Cavanagh et al // *Trends Cogn Sci.* 2014. V. 18. No 8. P. 414-421.
3. M. Strenziok et al. // *Neuroimage.* 2014. V. 85. P. 1027-1039.
4. M.J. Frank et al. // *Journal of Neuroscience.* 2015. V. 35. P. 485-494.
5. K.-K. Ang et al. // *Clin EEG Neurosci.* 2015. V. 46. No. 4. P. 310-320.
6. J. Ethan et al. // *Brain research.* 2015. V. 1597. P. 95-107.
7. C. Francois et al. // *Front Psychol.* 2015 V. 6.
8. K. Spiegelhalder et al. // *Behav Brain Res.* 2014. V. 258. P. 75-79.
9. S. Dikker et al. // *Curr Biol.* 2017. V. 27. P. 1375-1380.
10. F. Vecchio et al. // *Neuroscience.* 2016. V. 316. P. 143-150.
11. A.J. Ries et al. // *J. Neurosci. Neuroeng.* 2014. V. 3 No. 1. P. 10-20.
12. R. Padmavathi et al. // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.* 2014. V. 4. No. 4.
13. J.-S. Kang et al. // *Proceedings of the 3rd International Conference on Human-Agent Interaction.* ACM, 2015.
14. S. Sprague et al. // *Clinical Neurophysiology.* 2016. V. 127. P. 1331-1341.
15. U. Mody. *Artificial intelligence in brain computer interfaces.* Diss. California State University, Northridge, 2014.
16. S.E. Dilsizian // *Curr. Cardiol. Rep.* 2014. V. 16. No. 1. P. 441.

Фолдинг белков как процесс автоволновой самоорганизации в активных средах

Е.В. Малышко, В.А. Твердислов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра биофизики,
ул. Ленинские горы, д.1, кор.2, г. Москва, Россия, 119991*
katyamalyshko@mail.ru

Особое место в категории симметрий-асимметрий в биологических структурах занимает дуалистическое понятие хиральности. В нашем рассмотрении молекулярно-биологических систем мы пользуемся классическим определением хиральности: хиральность — свойство молекулы или объекта быть несовместимым со своим зеркальным отображением при любых комбинациях перемещений и вращений в трёхмерном пространстве. В энантимере (энантиоморфе) отсутствует симметрия относительно сторон и осевая симметрия.

Известно, что гомохиральность входящих в белки «левых» L-аминокислот обеспечивает стереоспецифичность комплементарных взаимодействий и минимизирует объём информации, необходимый для однозначного кодирования нуклеиновыми кислотами аминокислотных последовательностей. Также известно, что дезоксирибоза и рибоза, входящие в состав уникальных ДНК и РНК, являются «правыми» D-изомерами.

Хиральность мономеров, составляющих основу информационно детерминированных биополимеров, белков и нуклеиновых кислот, обычно воспринимается как иррациональный эпизод в целесообразном эволюционном процессе, как «плата» за уникальную способность углерода образовывать огромное количество неорганических и органических соединений, гармонично связывающих в единое целое структуры и функции живых систем. А гомохиральность первичных структур воспринимается как тривиальный выход из дуалистической ситуации.

Мы высказываем принципиально иную точку зрения на проблему хиральности: хиральный дуализм является фундаментальной основой структурообразования в молекулярной биологии, а хиральность названных соединений – аминокислот, рибозы и дезоксирибозы – есть важнейший инструмент иерархической стратификации внутримолекулярных и надмолекулярных структурных уровней, а также специфичности взаимодействий между макромолекулами одинаковых и разных классов.

В макромолекулярных системах нуклеиновых кислот и белков нами впервые были выделены как целое, как хиральные инварианты молекулярной биологии знакопеременные иерархии хиральных структур в последовательностях от «нижнего» асимметричного атома углерода в sp^3 -гибридизации до суперспиралей и надмолекулярных структур. Отмечено чередование знака хиральности D-L-D-L при переходе на более высокий уровень структурно-функциональной организации ДНК. Две базовые первичные полимерные цепочки ДНК составлены молекулами D-дезоксирибозы. Цепочки соединены нуклеиновыми основаниями в «левой» гош-конформации, а все вместе они образуют известную «правую» двойную спираль ДНК. У бактерий кольцевая «правая» спираль скручивается в «левую» суперспираль.

У белков первичная цепочка – это последовательность «левых» аминокислотных остатков. Образую вторичные структуры, она скручивается в «правые» α -спирали, которые, в свою очередь, сворачиваются в «левые» суперспирали. Четвертичные структуры белков, собирающиеся уже из самостоятельных молекул, снова образуют

«правые» витые конструкции. У белков последовательность смены знака хиральности в структурно-функциональной иерархии: L-D-L-D (рис.).

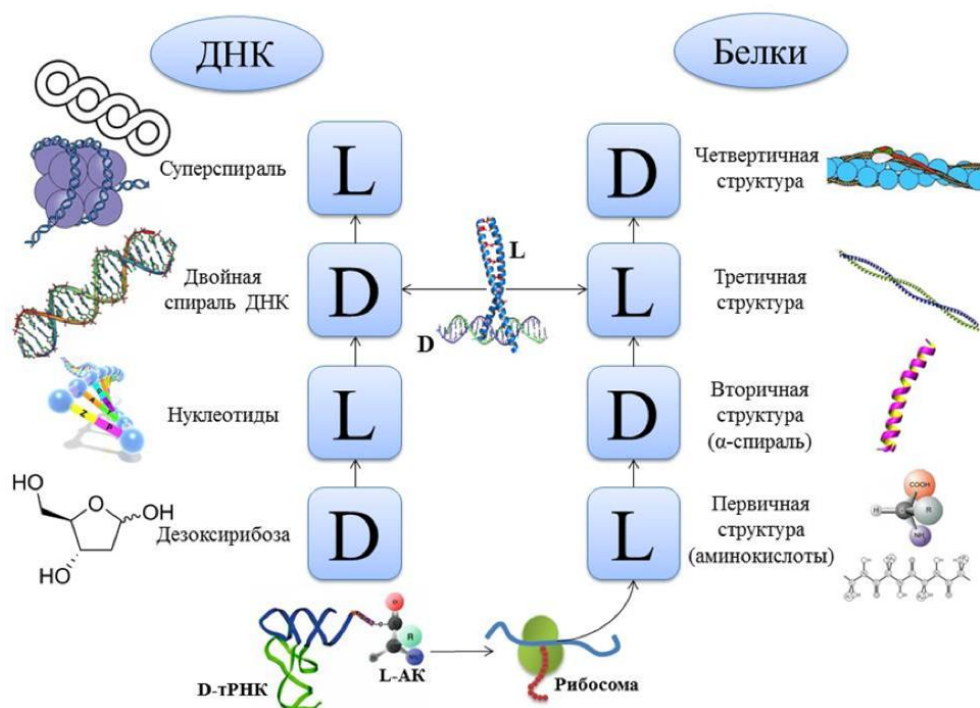


Рис.1 Периодическая таблица знакопеременных иерархий хиральных (спиральных) структур от первичной до четвертичной для ДНК (левая колонка) и белков (правая колонка): L – левая конфигурация энантиомера или спирали, D – правая конфигурация.

Формирование знакопеременных хиральных иерархий в макромолекулярных структурах обусловлено четкой физической причиной – стремлением системы понизить исходный уровень свободной энергии, образующийся при энергозависимом отборе гомохиральных мономеров первичных структур макромолекул из их рацемических смесей. Заметим, что в неживой природе имеется множество примеров спонтанного формирования подобных иерархий и что живая природа успешно адаптировала этот принцип. Описанная для белков и нуклеиновых кислот спонтанно формирующаяся знакопеременная хиральная иерархия не является «изобретением» исключительно живой природы: она свойственна механическим, гидродинамическим, жидкокристаллическим, различным биомиметическим и прочим системам [1, 2].

Знакопеременная хиральная иерархичность сопряженных уровней структур в макромолекулах имеет общебиологическую значимость: обуславливает дискретность этих уровней, служит инструментом пространственной самоорганизации (уникальной самосборки - фолдинга), структурной основой «выделенных механических» степеней свободы в конструкциях биологических макромолекулярных машин.

Известен парадокс, сформулированный в 1968 году Сайрусом Левинталем: «Промежуток времени, за который полипептид приходит к своему скрученному состоянию, на много порядков меньше, чем если бы полипептид просто перебирал все возможные конфигурации» [3]. Этот же термин относят и к проблеме свертывания нуклеиновых кислот. Объяснение этого парадокса связывают с предположением о существовании воронки в конфигурационном пространстве на поверхности потенциальной энергии со сложным ландшафтом, которая втягивает процесс сворачивания полипептидной цепи в нативную конформацию. Предполагается, что эта

воронка, характеризующаяся минимумом свободной энергии, задает направление траектории фолдинга в конфигурационном пространстве макромолекулы, проходящей через цепочку локальных минимумов энергии. Мы предполагаем, что обнаруженные нами знакопеременные хиральные комплементарные друг к другу последовательности структурных уровней D–L–D–L и L–D–L–D для ДНК и белков образуют ту самую «нить Ариадны», которая направляет фолдинг макромолекул по необходимой траектории в ловушку Левинталя. Термодинамические обоснования состоят в следующем. Известно, что гомохиральная молекулярная субстанция, будь то раствор аминокислот или углеводов, подвергается рацемизации, стремясь уравнять концентрации энантиомеров, повышая до максимума энтропию системы и понижая уровень ее свободной энергии. Вместе с тем для линейного гомохирального полимера имеется принципиальная возможность понизить свою свободную энергию не только за счет рацемизации мономеров (назовем это «горизонтальной» рацемизацией), но и за счет «вертикальной» рацемизации: за счет создания структур высшего уровня с другим знаком хиральности. В данном рассмотрении в качестве частиц в системе выступают не сами молекулы, а «правые» и «левые» структурные единицы разного уровня организации.

В основе наших представлений о работе белков как молекулярных машин лежат систематизированные данные о периодичности в пространственной иерархической структуре самих макромолекул и об их циклическом функционировании во времени как машин. В самом общем плане, на сегодняшний день не представляя деталей, мы можем рассматривать внутримолекулярные волновые процессы в качестве физической основы самоорганизации (фолдинга) макромолекул и их функционирования как ферментов, рецепторов, каналов, насосов и так далее. Процесс «укладки» одномерной первичной структуры в периодические спиральные и складчатые участки вторичной и третичной структур является, на наш взгляд, одномерной автоволновой структурообразования. В свою очередь, волновые процессы функционирования молекулярных машин развиваются по «выделенным механическим степеням свободы», сформированным регулярными иерархическими структурами с периодически изменяющимся знаком хиральности. В принципе, речь идет о новой интерпретации старой идеи «конформационных волн» в макромолекулах, но уже основанной на представлениях об одномерной активной среде с распределенным ресурсом энергии и автоволновым механизмом самоорганизации.

В масштабах общего поля метаболизма и биосинтеза хиральные соединения одного и разных классов «распознают партнеров» по знаку хиральности, совпадающему или противоположному. С точки зрения симметричности, поле хиральных соответствий в молекулярной биологии можно рассматривать как диссипативную систему - активную среду с автоволновой самоорганизацией.

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00029).

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Твердислов // Биофизика. 2013. Т. 58. No 1. С. 159.
2. С.В. Стовбун, А.А. Скоблин, В.А. Твердислов // Биофизика. 2014. Т. 59. No 6. С. 1079.
3. В.А. Твердислов, Е.В. Малышко, С.А. Ильченко // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. No 3. С. 1728

Интерфейс мозг-компьютер для оценки психофизиологического состояния человека

Е.Н. Пицик, В.А. Максименко, В.О. Недайвовоз, А.Е. Храмов
Научно-образовательный центр «Системы искусственного интеллекта и нейротехнологии»
pitsikelena@gmail.com

Интерфейсы мозг-компьютер (ИМК) являются современной технологией, основывающейся на отслеживании характерных форм электрической активности головного мозга в режиме реального времени и преобразовании полученной информации в команды для устройства управления (компьютера). Данная технология высоко востребована в различных областях науки и техники, включая медицину и производство [1-5]. Современные разработки в области ИМК позволяют пользователю контролировать 2-D движения курсора [6], частично синтезировать речь [7], и осуществлять контроль за простейшими движениями [8]. Помимо этого, ИМК успешно используются в сфере реабилитации [9] и управления экзоскелетами [1] и роботами [10].

Данное исследование сфокусировано на разработке ИМК для оценки изменений в активности головного мозга, вызванными предъявлением неоднозначных визуальных стимулов. В качестве визуального стимула был выбран куб Некера [11], представляющий собой куб с прозрачными гранями и видимыми рёбрами, воспринимаемый как 3-D объект благодаря специфическому расположению рёбер. Неоднозначность куба Некера заключается в возможности интерпретации этого 3-D объекта как развёрнутого налево, так и направо в зависимости от различной контрастности $I \in [1,0]$ [12] внутренних рёбер куба.

В процессе исследования мы провели серию экспериментов, направленных на составление массива ЭЭГ-данных. В экспериментальной работе приняли участие условно здоровые добровольцы как мужского, так и женского пола, в возрасте от 20 до 43 лет с нормальным или исправленным зрением. Все участники экспериментов были проинструктированы нажимать левую или правую кнопку на пульте в зависимости от их первого впечатления об ориентации куба. Продолжительность эксперимента составляла 10-15 минут для каждого участника, включая краткие периоды записи фона перед и после предъявления куба. Во время экспериментальных сессий, кубы с разной контрастностью рёбер показывались случайным образом (в среднем по 30 раз для каждой конфигурации), параллельно производилась запись ЭЭГ головного мозга с использованием электроэнцефалографа «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (Медиком МТД, Россия), позволяющим одновременно производить запись с 20 ЭЭГ-каналов, и устройства ввода с двумя кнопками.

Был произведён анализ ЭЭГ-сигнала, полученного с пяти электродов (O_1, O_2, P_3, P_4, P_z), которые были расположены в соответствии с расширенной международной системой 10-20 [13]. В качестве анализирующего метода было выбрано непрерывное вейвлетное преобразование [14]. Вейвлетный спектр $E^n(f, t) = \sqrt{W_n(f, t)^2}$ был рассчитан для каждого канала $X_n(t)$ в частотном диапазоне $f \in [1,30]$ Гц, где $W_n(f, t)$ - это комплексные вейвлетные коэффициенты, рассчитываемые по формуле:

$$W_n(f, t) = \sqrt{f} \int_{t-4/f}^{t+4/f} X_n(t) \psi^*(f, t) dt, \quad (1)$$

где $n = 1, \dots, N$ – это номер канала ($N=5$), «*» - операция комплексного сопряжения. В качестве материнского вейвлета взят вейвлет Морле, который часто используется для анализа нейрофизиологических данных и описывается выражением:

$$\psi^*(f, t) = \sqrt{f} \pi^{1/4} e^{j\omega_0 f (t-t_0)} e^{-f(t-t_0)^2/2}, \quad (2)$$

где $\omega_0 = 2\pi$ – центральная частота вейвлета.

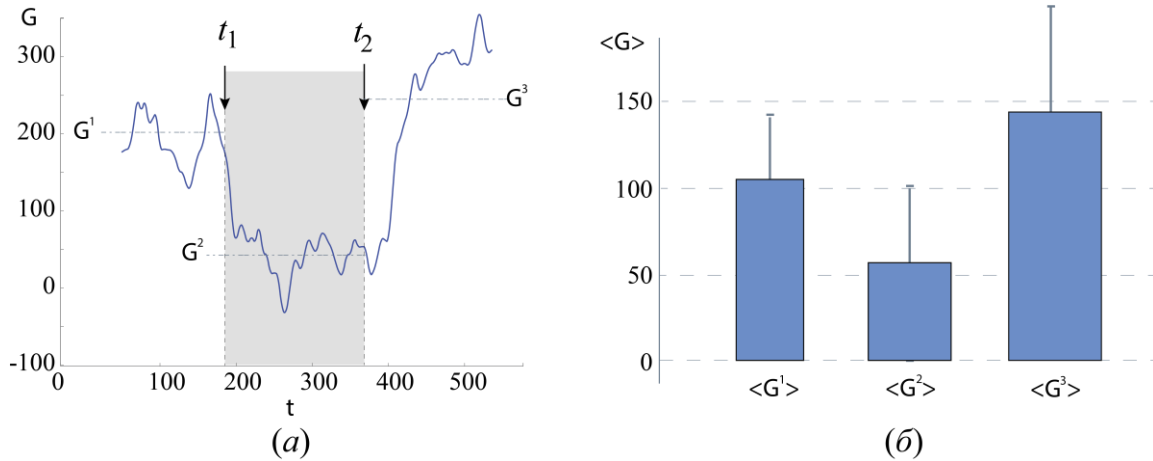


Рис. 1. (а) Зависимость контрольной характеристики $G(t)$ от времени, рассчитанное для одного испытуемого; серая область соответствует временному интервалу, в котором испытуемый подвергался внешнему воздействию; (б) значения $G(t)$, усреднённые по всем испытуемым и по всем временным интервалам $t < t_1$, $t_1 < t < t_2$, $t > t_2$, соответственно.

Вейвлетный спектр ЭЭГ-сигнала был рассчитан с использованием плавающего окна длиной в 2 секунды в интервале между 4 до 30 Гц [26]. Каждое событие, связанное с предъявлением визуального стимула, было проанализировано отдельно в альфа- и бета-диапазоне, начиная за 1 секунду до предъявления стимула, и заканчивая моментом появления стимула. В результате, набор значений A_I , A_{II} , B_I , B_{II} был рассчитан для каждого предъявления следующим образом:

$$A_{I,II} = \sum_{n=1}^N \int_{t \in \Delta t_{I,II}} \xi^n(t') dt'', \quad \text{где } \xi^n = \begin{cases} 1, & \text{if } f_{\max}^n \in \Delta f_\alpha \\ 0, & \text{if } f_{\max}^n \notin \Delta f_\alpha \end{cases} \quad (3)$$

$$B_{I,II} = \sum_{n=1}^N \int_{t \in \Delta t_{I,II}} \xi^n(t') dt'', \quad \text{где } \xi^n = \begin{cases} 1, & \text{if } f_{\max}^n \in \Delta f_\beta \\ 0, & \text{if } f_{\max}^n \notin \Delta f_\beta \end{cases} \quad (4)$$

где $N=5$ – количество ЭЭГ-каналов, и f_{\max}^n - это позиция максимального спектрального компонента.

Полученные результаты были усреднены по шести предъявлениям, контрольная характеристика $G(t)$ была рассчитана как:

$$G(t) = \frac{(\langle A_I \rangle - \langle A_{II} \rangle) + (\langle B_I \rangle - \langle B_{II} \rangle)}{2}, \quad (5)$$

где $\langle \dots \rangle$ означает усреднённое значение.

Значение $G(t)$ было рассчитано в соответствии с уравнениями 3-5 в режиме реального времени. Оно отражает интенсивность отклика в активности головного мозга в ответ на визуальный стимул. Большое значение $G(t)$ связано с интенсивным ответом, что связано с сосредоточенной обработкой изображения испытуемым. С другой стороны, низкое значение $G(t)$ ассоциировано с отвлечённым состоянием испытуемого, когда тот не достаточно сфокусирован на визуальном стимуле.

Разработанный ИМК был экспериментально протестирован на трёх испытуемых, каждый из которых принял участие в 4-минутной экспериментальной сессии. Результаты представлены на рис. 1. Стрелками обозначены моменты времени t_1 и t_2 , когда внешнее воздействие включалось и выключалось, соответственно, разделяя эксперимент на три секции. Во время первой секции, испытуемый выполнял задание в отсутствие внешнего воздействия. Заметно, что $G(t)$ колеблется возле определённого среднего значения G^1 , индивидуального для каждого испытуемого. После включения внешнего воздействия, значение $G(t)$ резко падает и начинает колебаться возле среднего G^2 , значительно более низкого, чем среднее в предыдущей секции. После же выключения внешнего воздействия, $G(t)$ значительно возрастает для всех испытуемых.

Важно отметить, что значительные изменения $G(t)$ наблюдаются внутри относительно коротких временных интервалов (менее 30 секунд), во время которых визуальные стимулы предъявлялись около 5 раз. Это означает, что значительное снижение внимания может быть мгновенно обнаружено в реальном времени.

Применение ИМК-контроля отклика активности головного мозга в ответ на предъявление визуальных стимулов выявило возможность отслеживания снижения внимания и сосредоточенности, основываясь на соответствующем ЭЭГ-сигнале, что имеет важное значение для разработок тренировочных и обучающих систем, основанных на анализе мозговой активности в режиме реального времени.

Работа поддержана Программой поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-2737.2018.2) и грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ (проект МК- 992.2018.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. T. Kawase et al. // J. Neural. Eng. 2017. V. 14 No. 1. P. 016015.
2. M. Spler // PLOS ONE. 2017. V. 12. P. 1-12.
3. K. Bowsher et al. // J. Neural. Eng. 2016. V. 13. No. 2. P. 023001.
4. X. Chen et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2015. V. 112. No. 44. P. E6058-E6067.
5. V.A. Maksimenko et al. // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 2487
6. J.R. Wolpaw, D.J. McFarland // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2004. V. 101. No. 51. P. 17849-17854.
7. N. Birbaumer et al. // Nature. 1999. V. 398. P. 297298.
8. T. Ma et al. // J. Neural. Eng. 2017. V. 14. No. 2. P. 026015.
9. J.J. Daly et al. // Lancet Neurol. 2008. V. 7. No. 11. P. 1032-1043.
10. L. Peternel et al. // PLOS ONE. 2016. V. 11. P. 1-26.
11. L.N. Esq // Lond. Edinb. Dubl. Phil. Mag. 1832. V. 1. No. 5. P. 329-337
12. A.E. Runnova et al. // Chaos Solitons Fractals. 2016. V. 93. P. 201-206.
13. E. Niedermeyer, F.L. da Silva // Lippincot Williams & Wilkins. 2014.
14. A.N. Pavlov et al. // Physics-Uspokhi. 2012. V. 55. No. 9. P. 845-875.

Колебательные и волновые процессы в интегрированных сегнетоэлектрических устройствах нового типа

А.Э. Рассадин¹, И.В. Ракуть^{1,2}

¹Нижегородское математическое общество

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

brat_ras@list.ru

Самым ярким достижением текущего десятилетия в области физики сегнетоэлектриков стало открытие в 2011 году двуслойной структуры из цирконата-титаната свинца $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,2}\text{Ti}_{0,8})\text{O}_3$ и титаната стронция SrTiO_3 , демонстрирующей при комнатной температуре отрицательную дифференциальную ёмкость [1]. Назовём такую структуру NC-конденсатором. Зависимость электрического напряжения U_{NC} на этой структуре от электрического заряда q имеет вид [1]:

$$U_{NC}(q) = -\alpha \cdot q + \beta \cdot q^3, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0. \quad (1)$$

В течение 2017 года в работах [2-12] было изучено поведение ряда простейших радиотехнических систем, в которых линейные конденсаторы с положительной ёмкостью заменены на NC-конденсаторы. Принципиальные электрические схемы этих систем приведены на рис. 1.

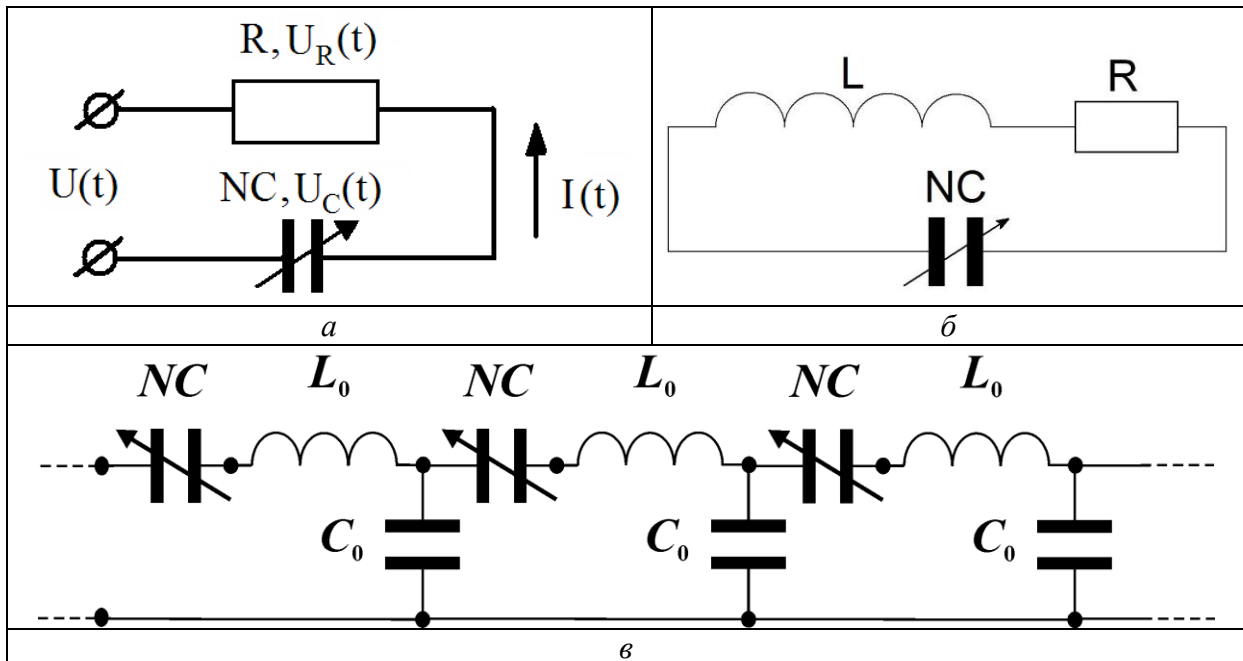


Рис. 1. Радиотехнические системы с NC-конденсаторами: (а) аналог RC-цепи, (б) колебательный контур, (в) длинная линия.

Исследования аналога RC-цепей стандартной радиотехники представлены в докладах [2-6], а именно, в докладе [2] найдена форма входного напряжения, при котором уравнение для заряда NC-конденсатора в схеме на рис. 1а допускает точное решение. В докладе [3] описана реакция этой цепи на кусочно-постоянное входное напряжение, в том числе и на ряд сверхширокополосных сигналов. В докладе [4] с помощью точных решений, полученных в докладах [2] и [3], найдена реакция цепи на рис. 1а на ряд периодических сигналов специального вида. Доклад [5] посвящён

исследованию воздействия на устройство на рис. 1а гауссовского дельта-коррелированного шума в рамках метода рядов А.А. Красовского. В докладе [6] предложена эквивалентная схема NC-конденсатора, пригодная для использования симуляторов типа SPICE, и с помощью этой схемы промоделированы переходные процессы в системе из двух последовательно соединённых схем на рис. 1а с NC-конденсаторами.

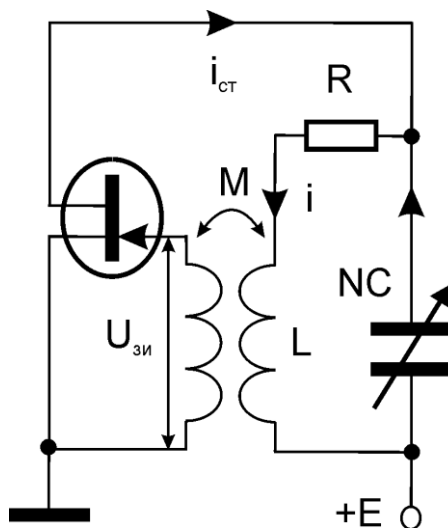


Рис. 2. Аналог генератора Ван-дер-Поля с NC-конденсатором в цепи колебательного контура.

Анализ свойств колебательного контура с NC-конденсатором (схема на рис 1.б) дан в работах [7-10], в частности в статье [7] вычислена зависимость коэффициента нелинейных искажений по напряжению на NC-конденсаторе от электромагнитной энергии, запасённой в контуре с нулевым электрическим сопротивлением. В докладе [8] найден закон убывания средней за период энергии в таком контуре с течением времени при учёте сопротивления. Доклад [9] посвящён огрублённому статистическому описанию колебательного контура на рис 1.б, находящегося под воздействием входного напряжения в виде гауссовского дельта-коррелированного случайного процесса с нулевым средним, а именно, в этом докладе выведено уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова для функции распределения по средним энергиям контура за период. В докладе [10] для косинусоидального входного напряжения, воздействующего на контур на рис. 1.б, вычислена функция расщепления сепаратрис, показан её знакопеременный характер, т.е. наличие в рассматриваемой системе режима хаотических колебаний. Это означает, что данное устройство может быть использовано как генератор хаоса в системах широкополосной прямохаотической передачи информации.

Однородная цепочка с NC-конденсаторами, соединёнными последовательно с индуктивностями, представленная на рис. 1.в, в статье [11] описана с помощью нелинейного уравнения Клейна-Гордона-Фока, для которого найдены его точные решения в виде бегущих волн, использованные затем для моделирования распространения нелинейных модулированных волн в этой системе в рамках теории Уизема. Устойчивость уединённой волны заряда в такой длинной линии относительно воздействия на неё малых возмущений исследована в докладе [12].

В данном докладе рассмотрен аналог генератора Ван-дер-Поля, у которого обычный конденсатор в цепи колебательного контура заменён на NC-конденсатор. Его электрическая схема представлена на рис. 2.

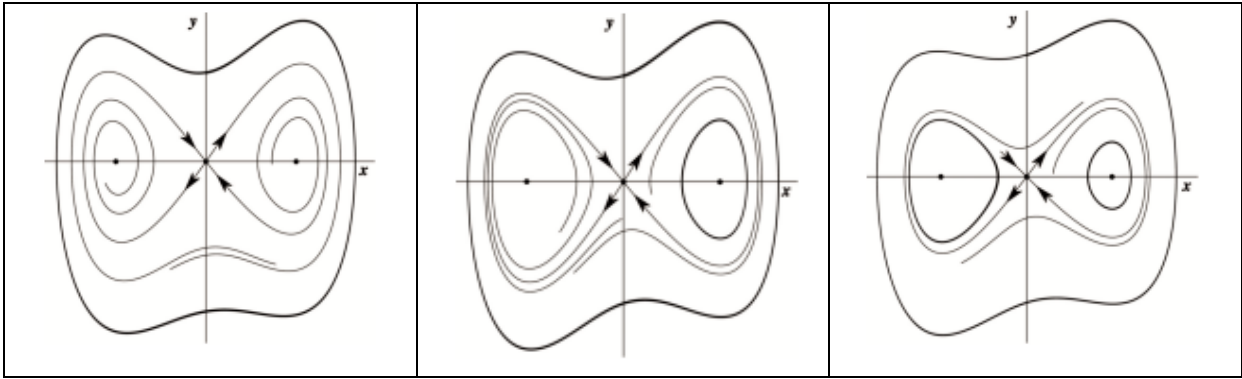


Рис. 3. Фазовые портреты уравнения Дуффинга-Ван-дер-Поля.

Показано, что при аппроксимации зависимости тока стока полевого транзистора этого генератора от напряжения u_g «затвор-исток» полиномом 3-ей степени:

$$i = i_0 + a_1 \cdot u_g + \frac{a_2 \cdot u_g^2}{2} + \frac{a_3 \cdot u_g^3}{3}, \quad (2)$$

и в предположении о том, что в колебательном контуре генератора активное сопротивление отсутствует ($R = 0$), уравнение для безразмерного заряда $x = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} \cdot q$ на НС-конденсаторе имеет вид:

$$\ddot{x} - x + x^3 = \varepsilon \cdot (p_1 + p_2 \cdot x + p_3 \cdot x^2) \cdot \dot{x}, \quad (3)$$

где $\varepsilon = \frac{M}{\sqrt{\alpha \cdot L}}$, точка означает дифференцирование по безразмерному времени

$\tau = \sqrt{\frac{\alpha}{L}} \cdot t$, а остальные параметры равны:

$$p_1 = -\alpha \cdot a_1, \quad p_2 = -\frac{M}{L} \cdot a_2 \cdot \frac{\alpha^{5/2}}{\sqrt{\beta}}, \quad p_3 = \alpha \cdot \left(3 \cdot a_1 - \frac{M^2}{L^2} \cdot \alpha^3 \cdot a_3 \right) \quad (4)$$

(смысл входящих в выражения (4) величин ясен из рис. 2, а также из формул (1) и (2)).

Уравнение (3) называется уравнением Дуффинга-Ван-дер-Поля. Для $p_3 = -1$ оно подробно исследовано в работе [13]. Там, в частности, доказано, что в этом случае в зависимости от значений параметров p_1 и p_2 при достаточно малых ε уравнение (3) в отличие от обычного уравнения Ван-дер-Поля может иметь от одного до трёх предельных циклов. Примеры таких циклов представлены на рис. 3.

Все описанные в этом докладе устройства совместимы с микроэлектронной технологией [1], и, следовательно, могут быть отнесены к классу интегрированных сегнетоэлектрических устройств [14]. Кроме того, последний пример показывает, что системы с НС-конденсаторами представляют собой принципиально новую ветвь радиотехники, отличающуюся от уже известных её разделов богатством и разнообразием рабочих режимов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-08-01356-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.I. Khan et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. P. 113501.
2. А.Е. Рассадин et al. // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), June 29–30, 2017, Astana, Kazakhstan (<http://ieeetpu.ru/proceedings/papers/3ed315.pdf>). Дата обращения: 23.04.2018.
3. O.S. Kostromina, I.V. Rakut, A.E. Rassadin // Book of Abstracts: International Workshop on Phase Transitions and Inhomogeneous States in Oxides. June 25-30, Kazan, Russia. – Kazan: Kazan University Press, 2017. P. 28.
4. А.Э. Рассадин и др. // Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» «РАДИОИНФОКОМ-2017» (13-17 ноября 2017 г., Москва, Россия). Часть II. С. 592.
5. А.Е. Рассадин et al. // Proc. 14th Sino - Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies / Ed. Mingxing Jia (Sanya, Hainan Province, China: November 28 - December 1, 2017).- Beijing: Metallurgical Industry Press (China, <http://www.cn mip.com.cn>). Дата обращения: 23.04.2018. 2017. P. 478. (ISBN 978-7-900853-01-1).
6. M.M. Gourary et al. // Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium, Novi Sad, Serbia, 2017, P. 113.
7. А.Е. Рассадин et al. // Eurasian Physical Technical Journal. 2017. V. 14. N 2 (28). P. 14.
8. А.Э. Рассадин и др. // Proc. 10-th Int. Scientific Conf. «Chaos and Structures in Nonlinear Systems. Theory and Experiment», devoted to the 75th anniversary of Prof. Z. Zhanabaev (Kazakhstan, Almaty, June 16 – 18, 2017).- Almaty: Al-Farabi Kazakh National University, 2017. P. 321.
9. А.А. Potapov, А.Е. Rassadin, А.А. Tronov // Proc. 14th Sino - Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies / Ed. Mingxing Jia (Sanya, Hainan Province, China: November 28 - December 1, 2017).- Beijing: Metallurgical Industry Press (China, <http://www.cn mip.com.cn>). Дата обращения: 23.04.2018. 2017. P. 473. (ISBN 978-7-900853-01-1).
10. А.А. Potapov, А.Е. Rassadin, А.А. Tronov // Proc. 14th Sino - Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies / Ed. Mingxing Jia (Sanya, Hainan Province, China: November 28 - December 1, 2017).- Beijing: Metallurgical Industry Press (China, <http://www.cn mip.com.cn>). Дата обращения: 23.04.2018. 2017. P. 487. (ISBN 978-7-900853-01-1).
11. А.Э. Рассадин и др. // Учёные записки физического факультета Московского университета. 2017. N 6. 1760703.
12. А.А. Potapov, I.V. Rakut, А.Е. Rassadin // Proc. 14th Sino - Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies / Ed. Mingxing Jia (Sanya, Hainan Province, China: November 28 - December 1, 2017). - Beijing: Metallurgical Industry Press (China, <http://www.cn mip.com.cn>). Дата обращения: 23.04.2018. 2017. P. 494. (ISBN 978-7-900853-01-1).
13. A.D. Morozov, O.S. Kostromina // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2014. V. 24. N 5. P. 1450061.
14. К.А. Воротилов, В.М. Мухортов, А.С. Сигов “Интегрированные сегнетоэлектрические устройства” М.: Энергоатомиздат, 2011.

Шахматная доска молекулярной биологии

В.А. Твердислов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра биофизики,
ул. Ленинские горы, д.1, кор.2, г. Москва, Россия, 119991
tverdislov@mail.ru*

Симметрии и нарушения симметрии составляют физическую основу периодической структуры всей молекулярной биологии, системную основу дискретности строения и функционирования живых систем, их происхождения и эволюции. Одной из основополагающих категорий в системе симметрий-асимметрий для живых систем является понятие хиральности. Ранее нами было показано, что иерархии первичной, вторичной и т.д. структур белков и нуклеиновых кислот характеризуются сменой типов симметрии, увеличением масштабов и чередованием знаков хиральности, определяющих их физические особенности и молекулярно-биологические функции.

Выявлена и обоснована новая молекулярно-биологическая закономерность: начиная с уровня асимметричного углерода в дезоксирибозе и аминокислотах, прослежена тенденция чередования знака хиральности внутримолекулярных структурных уровней D-L-D-L для ДНК и L-D-L-D для белков [1]. Частными случаями хиральности выступают соединения асимметричного углерода, спиральность и суперспиральность.

Хиральность – дуалистическое свойство, определяющее, как мы теперь понимаем, не только особенности статической пространственной иерархической организации макромолекул, но и траекторию процессов их пространственной самоорганизации – фолдинга. Гомохиральность первичной структуры белков или цепочки (дезокси)рибозы у нуклеиновых кислот обуславливает наличие в системе рассредоточенного запаса свободной энергии, что придает ей свойства одномерной активной среды и создает предпосылки автоволновой самоорганизации – формирования спиральных, суперспиральных и складчатых регулярных структур [2]. Они, в свою очередь, образуют «выделенные механические степени свободы», свойственные молекулярным машинам. Периодический характер структур молекулярных машин и принципиальная цикличность их работы явным образом предполагают наличие волновых процессов в ходе их функционирования.

Смещение по фазе на половину периода знака хиральности соответствующих структурных уровней белков и нуклеиновых кислот, по всей вероятности, служит кодом распознавания «свой-чужой» для этих важнейших классов биомолекул. В таком случае всё поле молекулярно-биологических соответствий представляется в виде периодической таблицы - шахматной доски, где по клеткам хиральности передвигаются и взаимодействуют хиральные химические соединения.

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00029).

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Твердислов и др. // Биофизика. 2017. Т. 62. С. 421.
2. В.А. Твердислов, Е.В. Малышко, С.А. Ильченко // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. С.1728.

Автоволновая модель урбозкосистем как процесс автоволновой самоорганизации в активных средах

А.Е. Семина, Н.Т. Левашова, А.А. Мельникова, А.Э. Сидорова

*МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет,
кафедра биофизики, кафедра математики*

syoanya@yandex.ru, natasha@wanaku.net, melnikova@physics.msu.ru, sky314bone@mail.ru

Рассмотрена пространственно-временная автоволновая модель урбозкосистем (УЭС) как процесс автоволновой самоорганизации в активных средах, учитывающая неоднородности антропогенных и природных взаимодействий. Модель направлена на выявление особенностей пороговых значений управляющих параметров [1 - 3]. Данный вид экосистем характеризуется высокой скоростью роста численности и плотности населения за счет концентрации жилых, промышленных, торговых и иных объектов, а также средств коммуникации. Перечисленные условия нарушают динамическое равновесие потоков энергии, вещества и информации, снижают «буферную емкость» природных подсистем и увеличивают нелинейность, а, следовательно, и неустойчивость, системных процессов. В основе модели – модифицированное авторами уравнение ФитцХью–Нагумо, учитывающее неоднородности антропогенных (активатор) и природных (ингибитор) факторов. Обоснованность применения уравнения данного типа определяется относительной простотой системного анализа двух уравнений типа «активатор – ингибитор».

УЭС как сопряженные активные среды относятся к нелинейным динамическим макроструктурам, состоящим из сопряженных во времени и пространстве природных и антропогенных подсистем. В УЭС имеется распределенный ресурс (население, промышленные и жилые объекты, транспорт, геобиоценозы). При наличии возмущения в соседних ячейках, связанного с изменением ресурса, процесс способен стать автокаталитическим. И наиболее активный «водитель ритма» способен захватить все пространство УЭС (подобный процесс протекает в химической реакции Белоусова–Жаботинского). В результате увеличения численности и плотности населения растет плотность застройки, увеличивается количество транспорта, промышленных предприятий, торговых и других сопутствующих росту населения структур, протяженность коммуникаций, расширяются границы УЭС и т.д. Более того, растущие города имеют тенденцию к слиянию в общие системы. И результатом расширения и слияния УЭС является изменение площадей геобиоценозов (как городских, так и между городами), количественного (флуктуации) и качественного (бифуркации) состава трофических сетей.

Самоорганизация проявляется в образовании автоволновых диссипативных структур, формирующих выделенные степени свободы, и способна поддерживать устойчивость УЭС в допороговом состоянии. Управляющими параметрами данного процесса являются природные и антропогенные факторы (возбудимые элементы), формирующие длину и форму автоволн. При этом скорости антропогенных процессов, по меньшей мере, на порядок больше скоростей природных процессов [4], поэтому антропогенные процессы в данной модели мы полагаем активаторами, а природные – ингибиторами общесистемных процессов. Данные свойства позволяют качественно оценить пороговые и подпороговые условия распространения автоволнового процесса в зависимости от интенсивности источников воздействия, расположения возбудимых, слабовозбудимых и невозбудимых зон, наличия латентных источников автоволн, численности и плотности населения, и от других факторов.

На базе уравнения ФитцХью–Нагумо [5] авторами предложена модифицированная система уравнений [1 – 3]:

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial u}{\partial t} - \varepsilon D_u \Delta u &= -\frac{1}{\varepsilon} (u(u - \alpha(x, y))(u - 1) - uv), \quad -L \leq x, y \leq L, \quad t > 0; \\ \varepsilon \frac{\partial v}{\partial t} - \varepsilon D_v \Delta v &= -\gamma v + \beta u. \end{aligned} \quad (1)$$

где u – функция интенсивности антропогенных процессов (активатор); v – функция интенсивности природных процессов (ингибитор); α – параметр активации системы (определяется как величина, обратная плотности населения).

Анализ модели показал, что для двух городов разного диаметра с различными распределениями плотности населения формирование автоволнового фронта и, следовательно, слияние городов определяется размерами переходных зон [6] и значением плотности населения в переходной зоне относительно критического. Таким же образом, за счет присоединения близлежащих территорий с меньшей плотностью населения к основной территории УЭС, происходит формирование мегаполисов. Данные модельного расчета посредством безразмерной модели в полной мере согласуются с динамикой присоединения населенных пунктов Фили, Мазилово и Кунцево к Москве в 1946–1968 гг.

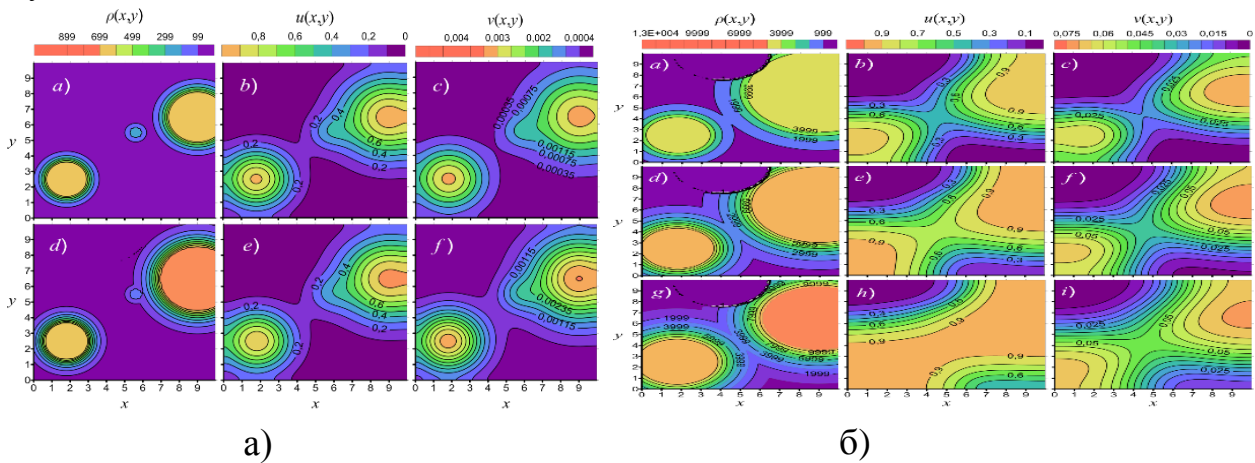


Рис. 1. а) Присоединение Мазилово к г.Фили 1947 год: а) плотность населения (ρ), б) функция интенсивности активатора (u), в) функция интенсивности ингибитора (v); 1949 год: д) плотность населения (ρ), е) функция интенсивности активатора (u), ф) функция интенсивности ингибитора (v). б) Присоединение г. Кунцево к Москве 1956 год: а) функция плотности населения (ρ), б) функция интенсивности активатора (u), в) функция интенсивности ингибитора (v); 1962 год: д) плотность населения (ρ), е) функция интенсивности активатора (u), ф) функция интенсивности ингибитора (v); 1968 год: г) плотность населения (ρ), г) функция интенсивности активатора (u), и) функция интенсивности ингибитора (v).

На основе картографических данных, планов развития и нормативных актов авторами построена модель развития Новой Москвы до 2030 года:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - D_u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) &= -\frac{1}{K^2 T^*} u(u - K\alpha(x, y))(u - N_B K) - \frac{1}{KT^*} uv, \\ \frac{\partial v}{\partial t} - D_v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) &= \frac{1}{T^*} (-\gamma v + u). \end{aligned} \quad (2)$$

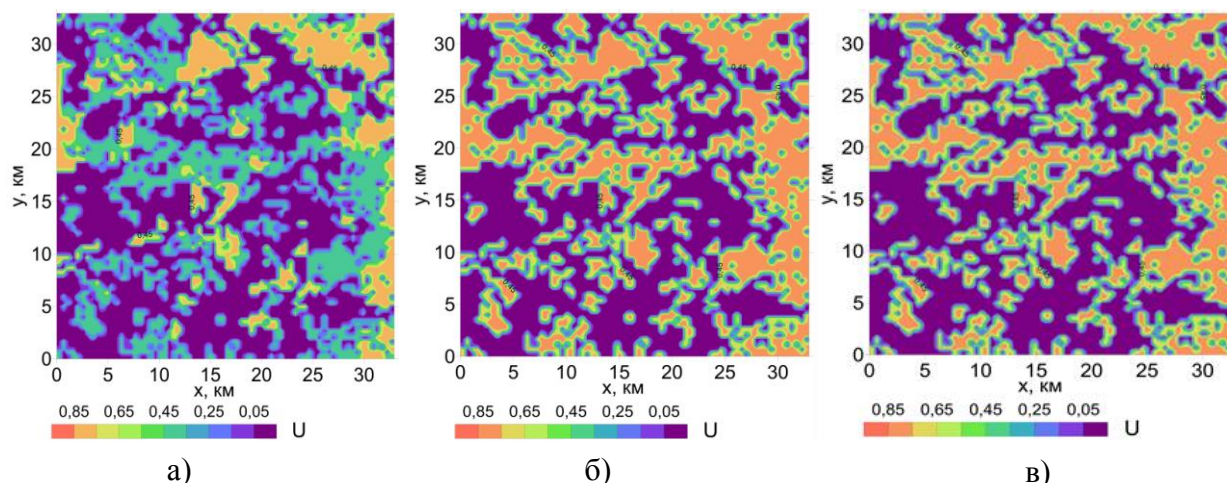


Рис. 2. . Модель развития Новой Москвы до 2030 года. Показана интенсивность функции активатора – площади застройки. А) Начальные условия, 2017 год; б) 2025 год; в) 2030 год.

0,85 - 0,75 – многоэтажная застройка, 0,65 - 0,25 – коттеджная застройка, 0,1- 0,05 - лесопарковая зона.

Анализ модели показал, что, возможны два варианта развития Новой Москвы (рис.2)

1. На начальном этапе соотношение застроенных площадей и биоценозов сохраняется что соответствуют нормативам площадей естественных биоценозов.
2. По мере застройки неизбежно будут расширяться площади сопутствующей инфраструктуры, что приведет к увеличению антропогенно преобразованных территорий на 5-10 % и возникновению неустойчивых состояний. Таким образом, при планировании застраиваемых территорий необходимо учитывать неизбежный рост автоволнового фронта антропогенных воздействий за счет сопутствующих увеличению численности и плотности населения площадей инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Э. Сидорова, Н.Т. Левашова, А.А. Мельникова, Н.Н. Дерюгина, А.Е. Семина // ВМУ, Серия 3. Физика. Астрономия. 2016. № 6. С. 39–452.
2. N. Levashova, A. Melnikova, A. Semina, Sidorova // Communication on Applied Mathematics and Computation, том 31, № 1, с. 32-42
3. А.Э. Сидорова, Н.Т. Левашова, А.А. Мельникова, Семина А.Е// Математическая биология и биоинформатика, 2017, Т.12. № 1. С. 186-198
4. В.С. Савенко «Геохимические аспекты устойчивого развития». М.: ГЕОС, 2003. 180 с.
5. FitzHugh R.A. // Biophys. J. 1961. P. 445–466.
6. В.Ф. Бутузов, Н.Т. Левашова, А.А.Мельникова. // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2012, т. 52, № 11, с. 1983–2003

Метод восстановления связей между отделами головного мозга человека в процессе обучения по данным электроэнцефалограммы

Н.С. Фролов^{1,2}, Д.В. Кирсанов¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

²Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

phrolovns@gmail.com

Понимание устройства головного мозга и его когнитивных функций, составляющих основу человеческого мышления, является одной из быстроразвивающихся и горячих тем в современной науке. В ответ на это, в обществе возникает потребность в использовании новых теоретических знаний на практике для повышения качества образования [1]. Естественным образом, эти научные направления развиваются самосогласованно и представляют широкие возможности для модификации образовательного процесса с ориентиром на последние тенденции из области нейро- и когнитивной науки [2].

В первую очередь представляется интересным проведение исследований, направленных на выявление форм и условий обучения, при которых усвоение и восприятие новой информации человеком является оптимальным. Ранее, в рамках нейрофизиологического исследования по записи электроэнцефалограмм (ЭЭГ) были изучены влияние музыкального образования на функционирование нейронной сети головного мозга [3]. Также, в рамках ЭЭГ исследований, была показана эффективность подкастинга, как нового технического средства для образовательного процесса [4].

На наш взгляд, эффективное решение подобных задач достигается при применении междисциплинарных методов и подходов, объединяющих такие научные направления как нейро- и когнитивная наука, статистическая физика и нелинейная динамика. С этих позиций, нелинейная динамика и статистическая физика позволяют развить и расширить математический аппарат методов обработки большого объема данных, получаемых в ходе нейрофизиологических исследований, и выявить ранее неизвестные особенности относительно динамики нейронной сети головного мозга. Широкое применение математических методов направлено на восстановление структуры функциональных связей между отделами головного мозга в процессе различных типов его активности [5]. Среди наиболее известных методов стоит выделить установление причинности по Грейнджеру [6], оценка нелинейных ассоциаций [7] и вейвлетной бикогерентности [8].

В настоящей работе мы применяем новый подход к анализу многомерных данных ЭЭГ, полученных в ходе регистрации электрического сигнала коры головного мозга человека при просмотре обучающих видеоматериалов, на основе нелинейно-динамического представления процессов, описываемых временными рядами. Кроме того, показана эффективность использования данного подхода для анализа именно нейрофизиологических данных. В литературе данный метод известен как рекуррентная мера зависимости (англ. Recurrent Measure of Dependence [9]) и опирается на установление взаимной зависимости процессов с точки зрения их условной вероятности. С помощью данного метода сигналы многоканальной ЭЭГ, регистрируемые в разных областях головного мозга, сравниваются попарно. В результате удается установить связаны ли процессы в различных зонах коры мозга, а также выявить интенсивность связи и оценить временную задержку.

Метод заключается в следующем. По имеющимся исходным сигналам, описывающим процессы X и Y , восстанавливаются траектории в фазовом пространстве $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ и $y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ соответственно. Для каждой траектории рассчитываются рекуррентные матрицы:

$$R_{ij}^X = H(\varepsilon - |x_i - x_j|), \quad R_{ij}^Y = H(\varepsilon - |y_i - y_j|), \quad (1)$$

где $H()$ – функция Хевисайда, а ε – размер рекуррентной области фазового пространства. На основе полученных матриц вычисляются вероятность того, что событие X принимает значение x_i как $P^X(x_i) = 1/N \sum_{j=1}^N R_{ij}^X$, и аналогично для события Y : $P^Y(y_i) = 1/N \sum_{j=1}^N R_{ij}^Y$

Также, считается взаимная рекуррентная матрица:

$$JR_{ij} = R_{ij}^X R_{ij}^Y, \quad (2)$$

и на ее основе вычисляется условная вероятность того, что событие X принимает значение x_i при том, что событие Y принимает значение y_i как $P^{XY}(x_i, y_i) = 1/N \sum_{j=1}^N JR_{ij}$. Чтобы определить насколько независимыми являются события X и Y в момент времени i , вычисляется величина рекуррентной меры зависимости:

$$RMD_i = P^{XY}(x_i, y_i) / (P^X(x_i)P^Y(y_i)). \quad (3)$$

Расчет рекуррентной меры зависимости позволяет провести анализ связи с учетом задержки τ путем смещения одного из временных рядов на необходимое количество единиц времени. В этом случае:

$$RMD(\tau) = \log_2 \left(\frac{1}{N'} \sum_1^{N'} RMD_i(\tau) \right), \quad (4)$$

где $N' = N - \tau$, а $RMD(\tau)$ подразумевает оценку величины RMD с учетом смещения сигнала Y на τ . В этом случае, для независимых процессов будем иметь $RMD=0$, в то время как ненулевое значение RMD при $\tau > 0$ говорит о влиянии X на Y , и наоборот для $\tau < 0$.

Анализ функциональных связей головного мозга человека при просмотре обучающего видеоматериала на основе данных ЭЭГ с применением описанного метода позволил выявить увеличение связей в затылочной зоне коры головного мозга и лобных долях по сравнению с фоновой активностью, что говорит об активации участков мозга, связанных с обработкой информации, а также зрительных функций человека.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ (проекты МК-5850.2018.2 и НШ-2737.2018.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. U. Goswami // Nature reviews neuroscience. 2006. – V. 7. – No. 5. – P. 406.
2. L. Meltzer “Executive function in education: From theory to practice” New York: Guilford Publications, 2018.
3. E. Altenmüller et al. // International journal of music education. – 2000. – No. 1. – P. 47-53.
4. M. Bensalem-Owen et al. // Neurology. – 2011. – V. 77. –No. 8. – P. e42-e44.
5. K.J. Friston // Brain connectivity. – 2011. – V. 1. – No. 1. – P. 13-36.
6. A.K. Seth, A.B. Barrett, L. Barnett // Journal of Neuroscience. – 2015. – V. 35. – No. 8. – P. 3293-3297.
7. F.L. da Silva, J.P. Pijn, P. Boeijinga // Brain topography. – 1989. – Т. 2. – №. 1-2. – С. 9-18.
8. A.E. Hramov et al. “Wavelets in neuroscience” Berlin: Springer, 2016.
9. B. Goswami // The European Physical Journal Special Topics. – 2013. – V. 222. – №. 3-4. – P. 861-873.

Помехоустойчивость OFDM-системы связи на базе Вейвлет-преобразования в зависимости от полосы частот, куда вводятся селективные замирения

Е.Н. Рычков¹, Ю.А. Пирогов²

¹Сибирский Федеральный университет, Красноярск

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

Eu.Rychkov@yahoo.com

Системы связи с OFDM-сигналами обладают высокой устойчивостью к селективным замирениям, позволяют повысить спектральную эффективность и предотвратить межсимвольную интерференцию благодаря возможности использования защитного интервала между OFDM-символами. При наличии узкополосных частотных помех появляется возможность адаптировать скорость связи, вид кодирования и некоторые другие параметры на конкретных поднесущих частотах, благодаря чему достигается выигрыш в помехоустойчивости вследствие эффективного распределения информации по частотному спектру [1]. Сигналы OFDM могут формироваться с использованием не только Фурье-базиса, но и других методов трансформации сигнала, таких, например, как Вейвлет-преобразование [2]. В [2] показано, что при наличии частотной режекции Вейвлет-базис в системе связи с OFDM-сигналами дает преимущество в сравнении с Фурье-базисом. Однако в [2] режекция не используется на комплексно-сопряженной части спектра. Более того, требуется рассмотреть, как влияет ширина полосы, куда вводятся селективные замирения, на помехоустойчивость системы связи.

Проведен эксперимент по сравнению помехоустойчивости систем связи с OFDM-сигналами. Используются Фурье- и Вейвлет- (biog 5.5 – из семейства биортогональных вейвлетов) базисы в условиях канала связи с селекцией по частоте, результат представлен на рис. 1.

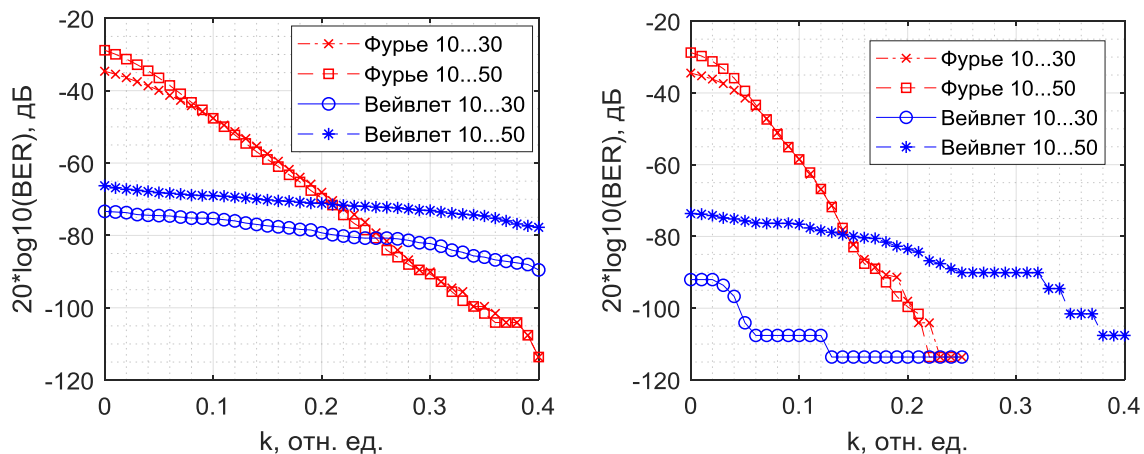


Рис. 1 – Помехоустойчивость системы связи для Фурье- и Вейвлет- базисов (слева без кодирования, справа – с ВНС-кодированием).

Для графиков потребовался логарифмический масштаб, чтобы иметь возможность сравнить кривые, полученные с разными параметрами, так как рассмотрение простой зависимости битовой ошибки от коэффициента k оказалось неудобным. Измерения проведены в диапазоне, который определяется на рис. 1 значениями частотных выборок “10...30” и “10...50”, подвергшихся замирениям. По оси абсцисс используется

коэффициент k , характеризующий уровень замираний, по оси ординат – битовая ошибка в системе связи, выраженная в дБ. На рис. 1 представлены данные эксперимента для случаев с ВСН-кодированием (справа, код Bose-Chaudhuri-Nocquenghem, т.е. Боуза-Чоудхури-Хоквингейма, с параметрами: длина кодового слова 15 и длина сообщения 5) и без кодирования (слева). Используется 4-х позиционная квадратурная амплитудная модуляция с длиной преобразования в 512 выборки и защитным интервалом $1/4$. Коэффициент k характеризует уровень подавления сигнала на выбранном частотном диапазоне.

При использовании Вейвлет-базиса сигнал во временной области формируется в два раза длиннее, чем в случае базиса Фурье. Это влечет за собой увеличение времени передачи информации, что может отразиться на улучшении помехоустойчивости системы связи. Увеличение длительности OFDM-символов можно скомпенсировать увеличением полосы замираний, что и можно рассмотреть на рис. 1.

Как видно на рис. 1, в системе связи без кодирования (слева) наблюдается выигрыш в помехоустойчивости для Вейвлет-базиса при значениях $k < 0,2$. Надо отметить, что при значениях k выше порога различения информационного бита системы как с Вейвлет-, так и с Фурье-базисом информация может восстанавливаться корректно. И это ожидаемо, так как когда информация частично теряется, существует порог соотношения сигнал/шум, выше которого как обе рассматриваемые системы обеспечат получение информации без ошибки при определенном количестве переданных информационных бит.

На рис. 2 приведено тестирование помехоустойчивости OFDM-систем связи с сигналами на базе Фурье- и Вейвлет-преобразований в тех же самых условиях частотной селекции, однако представлено 4 полосы частот, куда вводится селективное замирание. Кодирование не используется.

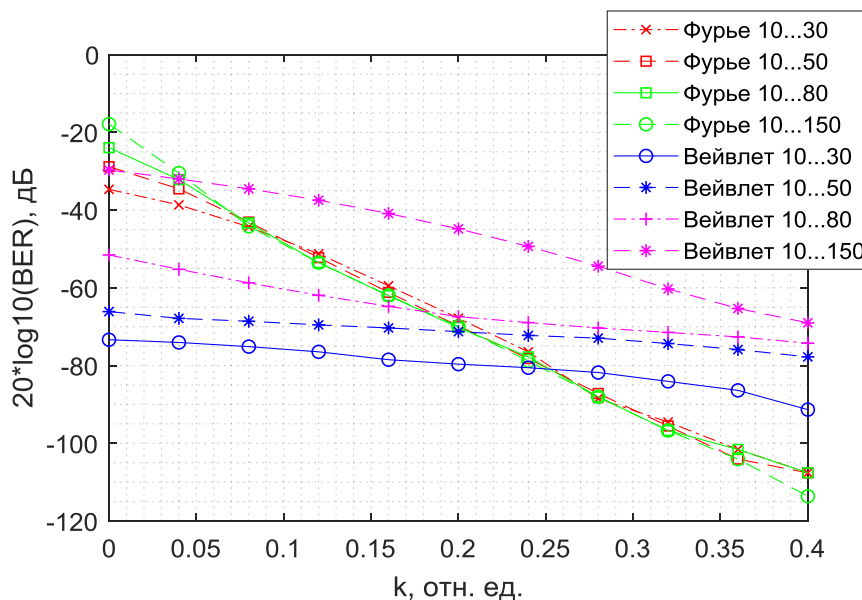


Рис. 2 – Помехоустойчивость системы связи для Фурье- и Вейвлет- базисов для различных полос, куда вводятся замирания.

На рис. 2 можно видеть, что с увеличением полосы режекции снижается помехоустойчивость системы связи с OFDM сигналом с Вейвлет-преобразованием в независимости от коэффициента k в рассматриваемом диапазоне от 0 до 0,4. При полосе 10...30 (маркер в виде круга) кривая лежит ниже всех остальных с большими полосами, на которые вводятся замирания. существует порог по коэффициенту k , $k =$

0,09, выше которого помехоустойчивость сигналов в случае с Фурье-базисом отличается несущественно. То есть в случае с селективными частотными замираниями система продолжает хорошо работать, если мы не добавляем шум в систему, ведь даже существенное изменение амплитуды сигнала на нескольких поднесущих частотах при определенном пороге уже не влияет на качество распознавания информационного бита, даже несмотря на маленькую амплитуду на поднесущей частоте. Ошибка около 100 дБ при переводе из логарифмического масштаба – это все-таки величина $1e-5$. В случае с Вейвлет-базисом также имеется тенденция к сближению кривых, полученных при разном значении полосы режекции.

Однако при коэффициенте подавления сигнала $k < 0,09$ можно видеть, что при увеличении полосы, куда вводится режекция, ухудшается помехоустойчивость не только в случае с Вейвлет-базисом, но и в случае с базисом Фурье. Также видно, что имеются пороги (k около 0,2 при полосе замираний в случай с Вейвлет 10...30, показано маркером в виде звезды), при которых Вейвлет-базис перестает давать выигрыш перед Фурье-базисом.

На рис. 3 представлены данные, аналогичные полученным на рис. 2, однако используются другие полосы замираний. Результаты получаются аналогичными. Однако при полосе замираний 10...20 в случае с Вейвлет-базисом помехоустойчивость становится идеальной примерно при $k > 0,33$, в соответствии с количеством переданных информационных бит, и поэтому график с маркером в виде круга стремится в нижнюю часть графика.

На рис. 2 и 3 замирания добавлены только в область частот до половины частоты дискретизации. После введения замираний и в комплексно-сопряженную часть, как показано на рис. 4, получается результат, представленный на рис. 5.

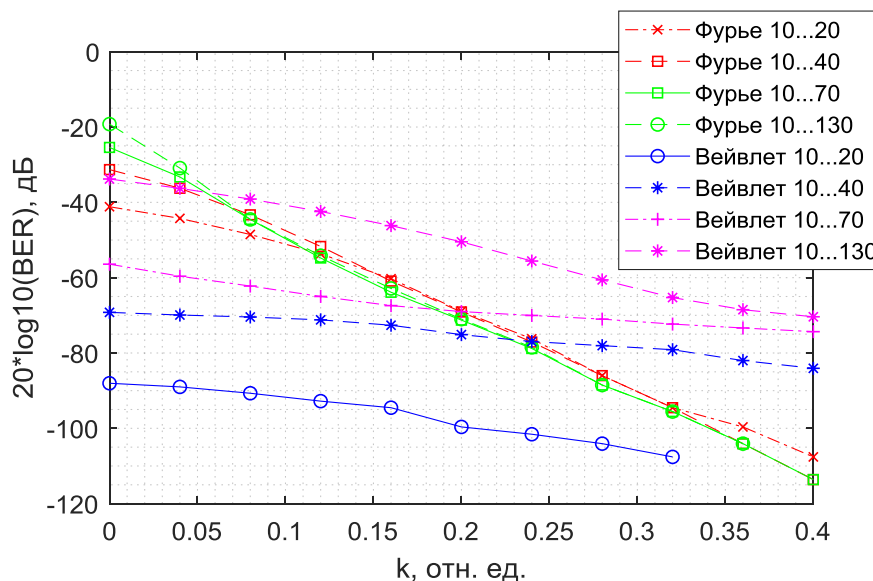


Рис. 3 – Помехоустойчивость системы связи для Фурье- и Вейвлет- базисов для различных полос, куда вводятся замирания, вариант 2 (другие полосы, куда вводится замирание).

На рис. 4 замирание добавляется как в часть спектра до половины частоты дискретизации, так и в комплексно-сопряженную часть спектра. На рис. 4 как раз показан спектр OFDM-сигнала на базе Вейвлет-преобразования, который прошел через идеализированный канал связи с упором на частотную режекцию. Выборки частот, которые характеризуют полосу замирания, показаны на рис. 4, это величины 1 и 25.

Показан и коэффициент $k = 0,1$. Видно, что количество выборок в два раза больше, чем для случая, который наблюдался бы при Фурье-преобразовании.

После введения замираний как в спектр до половины частоты дискретизации, так и в комплексно-сопряженную часть, как показано на рис. 4, характер изменения и взаимозависимости графиков, показанных на рис. 2 и 3, остается аналогичным. Существует порог k , выше которого Вейвлет-преобразование перестает давать выигрыш перед Фурье-базисом. При коэффициенте k около 0,12 помехоустойчивость системы связи с Фурье-базисом мало зависит от значения полосы частот, куда вводится затухание. Однако видно, что помехоустойчивость в общем снижена по сравнению со случаями на рис. 2 и 3, так как задета комплексно-сопряженная часть спектра.

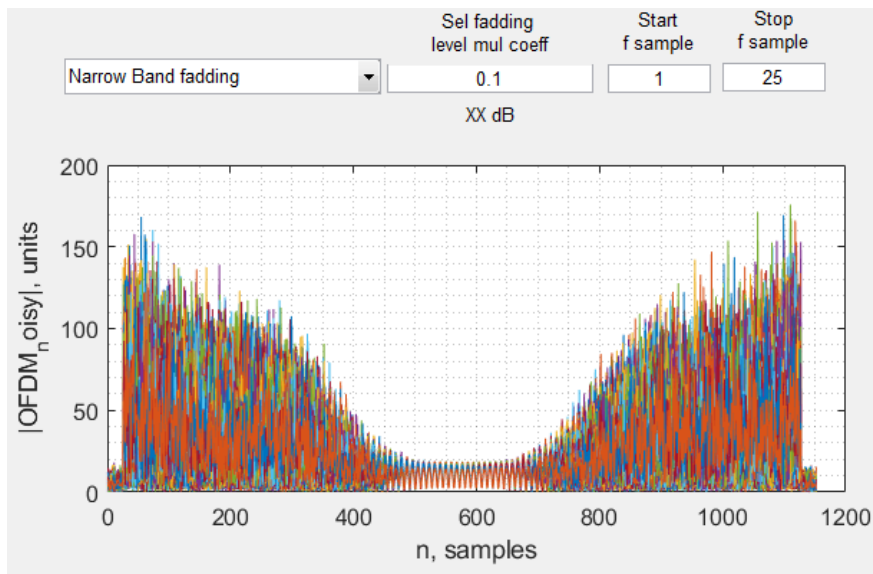


Рис. 4 – Добавление режекции в спектр OFDM-сигнала с использованием комплексно-сопряженной части спектра.

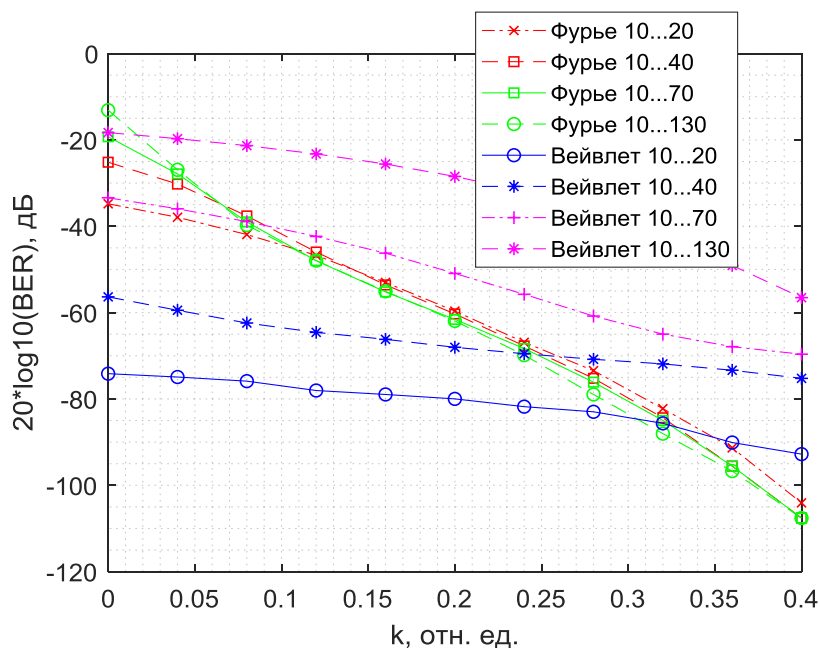


Рис. 5 – Помехоустойчивость системы связи для Фурье- и Вейвлет- базисов для различных полос, куда вводятся замирания, использовано введение затухания и в комплексно-сопряженную часть спектра.

Заключение

На рис. 1 при сравнении кривых “Фурье 10...30” и “Вейвлет 10...50” наблюдается выигрыш в помехоустойчивости при применении Вейвлет-базиса. При использовании кодирования повышение помехоустойчивости остается только при $k < 0,15$.

На рис. 2 сравнение кривых помехоустойчивости систем связи приводит к тому, что Вейвлет-базис дает выигрыш по сравнению с Фурье-базисом при больших уровнях замираний. Когда достигается некоторый порог, который варьируется в зависимости от полосы вводимых замираний, Вейвлет-базис перестает давать преимущество, что может быть связано с правильным детектированием информации в обеих сравниваемых системах связи. При введении селективных частотных замираний как на полосу до половины частоты дискретизации, так и на комплексно-сопряженные частоты, помехоустойчивость, как показано на рис. 5, уменьшилась. Однако закономерности сохранились, Вейвлет-преобразование по-прежнему дает выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с Фурье-базисом. Это происходит практически аналогично ситуациям, показанным на рис. 2 и 3.

Эксперименты проведены без учета аддитивного шума, чтобы понять непосредственно законы искажения информации при использовании Фурье- и Вейвлет-базисов в системах связи с OFDM-сигналами при введении замираний. Зависимости при воздействии аддитивного шума могут дополнить представления, полученные в данной статье, но по результатам работы видно, что даже при отсутствии шума имеется возможность сравнения эффективности базиса преобразования, применяемого в системе связи, при больших уровнях частотно-селективных замираний.

На рис. 4 видно, что Фурье-спектр Вейвлет-преобразования не представляет собой локализованных поднесущих частот. Теоретически имеется возможность распределения информации по спектру с некоторыми весами. Система, где используется такой принцип, не является ни OFDM-системой связи в классическом понимании, ни системой, в которой информация распределена по всему спектру. Так как Вейвлет-преобразование сходно по математическому преобразованию с Фурье-преобразованием, можно сделать вывод, что Вейвлет-преобразование может обеспечить случай, когда информация распределена по Фурье-спектру передаваемого сигнала с определенным законом. Стоит отметить, что при кодировании можно добиться подобных результатов, ведь одна и та же информация может быть представлена с помощью расширяющей последовательности и распределена по разным поднесущим частотам. Таким образом, для случая с Вейвлет-преобразованием стоит отметить, что его математический аппарат может обеспечить функции кодирования и адаптации к каналу связи. Полученные данные показывают, что Вейвлет-базис обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости системы связи с OFDM-сигналами при наличии селективных частотных замираний только в ограниченной и вполне определенной полосе частот. Однако выигрыш на рис. 1 достигает практически величины около 34 дБ при использовании канала с частотной режекцией (разумеется, в описанных идеализированных условиях).

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Prasad “OFDM wireless communication systems” / Prasad Ramjee – House Artech universal personal communications series, 2004.
2. Е.Н. Рычков, В.Г. Патюков, Ю.А. Пирогов // «Труды школы-семинара «Волны 2017»», М. – 2017, с. 35-38.