

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Кульминского Данила Дмитриевича «Ансамбли хаотических осцилляторов с запаздывающей обратной связью (реконструкция, коллективная динамика и приложения)»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Введение запаздывающей обратной связи делает размерность сосредоточенной динамической системы бесконечной и способно существенно усложнять динамику систем. Коллективные явления в ансамблях хаотических осцилляторов требуют особого рассмотрения в случае наличия запаздывающей обратной связи.

Задача определения структуры и количественной оценки связей в ансамблях, состоящих из большого числа взаимодействующих между собой элементов, по временным рядам их колебаний привлекает большое внимание исследователей. Важность этой задачи определяется тем, что архитектура и сила связей во многом определяют особенности коллективной динамики элементов ансамбля и возможность их синхронизации. Множество методов реконструкции связей разработаны для случаев, когда элементы исследуемых ансамблей либо не имеют запаздывающей обратной связи, либо ее величина предполагается известной. Вместе с тем, системы с запаздыванием широко распространены в природе и технике.

При изучении пространственно-временной динамики ансамблей осцилляторов были обнаружены многие нелинейные явления, включая образование различных структур, кластеризацию и синхронизацию. Долгое время считалось, что области синхронного и несинхронного поведения элементов ансамбля могут одновременно сосуществовать только в гетерогенных ансамблях осцилляторов, в которых происходит синхронизация осцилляторов с близкими частотами, а осцилляторы с существенно различающимися частотами колеблются несинхронно. Однако впоследствии было обнаружено, что и в ансамбле идентичных осцилляторов возможно состояние, при котором группа синхронно колеблющихся элементов существует с группой элементов, совершающих несинхронные колебания; такое состояние получило название «химера». Хотя состояния «химера» были не только предсказаны теоретически, но и наблюдались в экспериментах, их исследование продолжает представлять интерес; в частности, для систем с запаздыванием.

В свое время, открытие возможности синхронизации двух связанных идентичных хаотических систем положило начало разработке систем скрытой передачи информации, основанных на использовании различных видов хаотической синхронизации. Однако оказалось, что многие системы связи, использующие хаотические сигналы, характеризуются в действительности ограниченной конфиденциальностью. Представляет интерес поиск способов повышения уровня защиты передаваемой информации, в связи с чем может быть перспективным использование систем с запаздыванием, демонстрирующих хаотическую динамику высокой размерности, для осуществления скрытой передачи данных.

Вышеперечисленное определяет актуальность диссертационной работы Д.Д. Кульминского «Ансамбли хаотических осцилляторов с запаздывающей обратной связью (реконструкция, коллективная динамика и приложения)» как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, трех оригинальных глав и заключения. Объем диссертации составляет 140 страниц. Работа включает 45 рисунков. Список литературы содержит 135 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации; формулируются цели, предмет и методы исследования и выносимые на защиту положения; описываются научная новизна и практическая значимость работы, личный вклад соискателя Д.Д. Кульминского и краткое содержание работы.

В первой главе предлагается метод восстановления параметров элементов ансамблей, являющихся системами с запаздыванием, и архитектуры связей. Метод основан на минимизации целевой функции для каждого элемента ансамбля, характеризующей «расстояние» между точками реконструируемой нелинейной функции, отсортированными по величине абсциссы, и использовании различных алгоритмов для разделения восстановленных коэффициентов связи на значимые и незначимые. Применение метода демонстрируется как на модельных системах, так и на экспериментальных данных для цепочки радиотехнических генераторов с запаздыванием.

Во второй главе экспериментально и численно исследованы особенности коллективной динамики, в том числе «химера»-подобные режимы, в ансамбле идентичных бистабильных генераторов с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле. Рассмотрены различные способы формирования общего поля, осуществляющего глобальную связь осцилляторов, и исследовано влияние инерционных свойств и запаздывания общего поля на коллективную динамику осцилляторов. В физическом эксперименте системы с запаздыванием реализованы в виде электронных осцилляторов. Экспериментальная система состоит из 8 электронных генераторов с запаздыванием, связанных через общее поле.

В третьей главе предложена и экспериментально реализована система передачи информации с нелинейным подмешиванием информационного сигнала к хаотическому несущему сигналу. Благодаря тому, что в системе передатчик и приемник строятся на программируемых микроконтроллерах и используются цифровые линии передачи, удастся избавиться от ряда типичных для таких систем недостатков. Подробно исследована оригинальная схема передачи информации с переключением хаотических режимов и аналоговым каналом связи; для повышения устойчивости к шумам в приемник вводятся дополнительные элементы. Передатчик и приемник схемы построены на основе систем с запаздывающей обратной связью. В экспериментальной схеме они реализованы в цифровом виде на базе программируемых микроконтроллеров, что обеспечивает идентичность их параметров и улучшает качество информационного сигнала на выходе приемника.

Кроме того, в работе предложена система передачи информации, основанная на обобщенной хаотической синхронизации, в которой не требуется вспомогательная система в приемнике, за счет чего снимается вопрос об обеспечении идентичности используемых генераторов. Предлагаемая схема связи исследована численно и реализована в радиофизическом эксперименте. Демонстрируется высокая устойчивость схемы к шуму.

Исследования в работе проведены систематически и основательно, позволяя получить целостную картину предмета исследования, с надлежащим подбором методов. Сочетание теоретического анализа с экспериментальными работами делает исследование разносторонне завершенным и показывает одновременно высокую и широкую квалификацию автора.

По работе имеются следующие замечания и вопросы:

- (1) Интересна оценка автором того, насколько эффективно метод, предложенный в первой главе, может быть обобщен на случай нелинейной связи, как в работе [Pikovsky, EPL **119**, 30004 (2017)]. Представляется, что материал упомянутой статьи довольно близок к предмету исследования первой главы диссертации.
- (2) Касательно материала первой главы, неочевидно, насколько нетипичны и маловероят-

ны для систем рассматриваемого типа регулярные режимы динамики. Если они вероятны, то в идеальном случае метод, по-видимому, не будет позволять эффективно восстанавливать параметры элементов ансамбля и связей. Однако остается вопрос, будет ли метод применим и эффективен, когда регулярная динамика возмущена стохастическими шумами.

(3) Во второй главе, на стр. 36, соискатель вводит понятие «химеры» и упоминает примеры с локальной и с однородной глобальной связью.

Ряд авторов (например, Ю. Майстренко) включает в определение «химеры» требование, что «диаметр» сети связей элемента ансамбля с соседями меньше числа элементов в ансамбле (т.е. связь не является глобальной, или, хотя бы, однородной глобальной), но больше того, что может соответствовать локальной связи при некоторой топологии сети. Это требование выделяет состояния-«химеры» как особое явление в кинетике. В самом деле, первостепенный системный интерес к состояниям-«химерам» связан с фундаментальными вопросами статистической физики и кинетики: с одной стороны, динамика системы сложна и «работают» законы больших чисел, но с другой – нельзя говорить о равновесности (или локальной равновесности) и в общем случае не может быть построено статистическое описание, которое было бы аналогом термодинамически равновесного в статистической физике или слабо неравновесного, как во всех задачах физической кинетики. При глобальной связи невозможность равновесности полностью снимается; при локальной она снимается практически – задача превращается в типовую задачу о фронтах в среде с мультстабильностью состояния (в пределах каждой фазы состояние среды равновесно). В частности, в упомянутой в диссертации статье [43] авторы строго говорят о «химера»-подобных состояниях при глобальной связи, и лишь далее в тексте периодически используют сокращение «химеры» для них. Интерес к «подлинным» «химерам» порождает интерес и к «химера»-подобным состояниям в системах с локальной или однородной глобальной связью. По причине этого интереса в литературе понятие «химера» могло закрепиться в итоге, как за первыми, так и за вторыми. Представляется, что было бы уместным упомянуть это, вводя понятия «химеры». В работе рассматриваются «химеры» второго типа.

(4) В работе отсутствует проверка, являются ли наблюдаемые «химера»-подобные состояния явлением, связанным с конечностью размера ансамбля. (Подобную проверку можно найти в [43].) В самом деле, в ансамбле 1000 осцилляторов выход одного осциллятора из, допустим, хаотического кластера почти не изменяет поведение параметра порядка. Напротив, выход одного из 4-х или 6-и элементов из хаотического кластера существенно изменяет динамику параметра порядка, что может приводить к устойчивости некоторого распределения между кластерами в ситуации, когда такая устойчивость не имеет место для большого ансамбля. Поскольку экспериментальные результаты для ансамбля из 8 элементов подкреплены в диссертации численным счетом, представляется, что была возможна проверка численным счетом и для ансамбля из 1000 элементов.

(5) В работе имеются незначительные опечатки, не сказывающиеся на восприятии материала. Например,

стр. 15, строка 16: отсутствует абзацный отступ.

стр. 24, строка 6: «... гораздо на несколько порядков меньше...»

стр. 42, формула (2.8), и далее формулы (2.11)-(2.16): используется обозначение, принятое в англоязычной литературе: «arctan».

Существенных с научной точки зрения замечаний материал диссертации у меня не вызвал.

Отмеченные замечания являются больше вопросами и пожеланиями, чем замечаниями, или носят очень частный характер и не влияют на общее положительное впечатление от работы Д.Д. Кульминского, которая выполнена на хорошем профессиональном уровне. Анализ

полученных в диссертационной работе результатов дает основания отметить, что работу отличает актуальность обсуждаемых проблем, адекватность предложенных и использованных подходов и обстоятельность в проведении исследовательской работы. Результаты, выводы и научные положения работы являются новыми, а их обоснованность и достоверность не вызывает сомнений. Материалы работы достаточно полно отражены в 23-х публикациях, из которых 12 – в журналах, входящих в перечни ведущих рецензируемых и зарубежных научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Результаты докладывались на представительных российских и международных конференциях. Несомненно, автор является квалифицированным специалистом в области радиофизики и сложной динамики нелинейных систем; причем способен проводить как теоретические, так и экспериментальные исследования. Диссертационная работа Д.Д. Кульминского написана грамотным литературным языком, хорошо оформлена и является законченным научным исследованием.

В целом, диссертационная работа **«Ансамбли хаотических осцилляторов с запаздывающей обратной связью (реконструкция, коллективная динамика и приложения)»** написана на хорошем научном уровне, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям (в том числе соответствует второй части пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней»), и соответствует специальности **01.04.03 – «Радиофизика»**. Ее автор, Данил Дмитриевич Кульминский, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Я, Денис Сергеевич Голдобин, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Ст.н.с. группы Динамики геологических систем
Института механики сплошных сред УрО РАН
канд. физ.-мат. наук



Денис Сергеевич Голдобин
25.01.2018

Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра
614013, РФ, г. Пермь, ул. Акад. Королева, 1, ИМСС УрО РАН
тел.: +7-950-4411276, e-mail: Denis.Goldobin@gmail.com

Подпись кандидата физико-математических наук Голдобина Дениса Сергеевича заверяю

Ученый секретарь «ИМСС УрО РАН»,
к.ф.-м.н.

Н.А. Юрлова