

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Г.И. Стрелковой «Химерные структуры в ансамблях нелокально связанных хаотических осцилляторов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Диссертационная работа Г.И. Стрелковой лежит в рамках фундаментально важной тематики радиофизики и нелинейной динамики: она посвящена выявлению и исследованию пространственно-неоднородных структур различной степени сложности в динамике пространственно-распределенных автоколебательных систем. А именно, исследуются ансамбли нелокально связанных хаотических осцилляторов и реализуемые в них особые режимы поведения, так называемые химерные структуры, которые вызывают в последние два десятилетия все большее внимание исследователей из различных дисциплин. Это относительно сложно организованные в пространстве структуры, в которых чередуются области когерентного поведения (т.е. близких одновременных состояний соседних в пространстве осцилляторов) и некогерентного поведения (нерегулярного распределения сильно отличающихся друг от друга состояний соседних осцилляторов). Но сложность этих структур не самая высокая, это не произвольные пространственные распределения, а небольшое число локализованных областей со своим характерным пространственным распределением и своей характерной временной динамикой, которая может быть как почти периодической, так и развитой хаотической. Поэтому химерные структуры можно рассматривать как своеобразный вид самоорганизации сложного ансамбля, относительно простой динамики по сравнению с произвольной динамикой сколь угодно высокой размерности. Таким образом, описание химерных структур и формулировка условий их появления – это шаг вперед в понимании динамики многомерных нелинейных систем.

В рамках эмпирических исследований сложных систем, например, климатической, активно используются различные подходы к выделению пространственно-временных структур (эмпирические ортогональные функции, эмпирические моды различных видов, характерные нестационарные структуры, и т.п.), большая часть которых опирается на линейные разложения наблюдаемых полей в некотором функциональном базисе. Понятие химерных структур может быть использовано для расширения набора возможных относительно компактных способов описания наблюдаемой сложной динамики, что полезно и с теоретической, и с практической точек зрения.

В большом количестве работ в последние годы исследуются химерные структуры в системах различной природы с различными свойствами динамики индивидуальных осцилляторов. Обзор этих работ и результатов представлен в диссертации и показано место диссертационной работы среди них. Оригинальной чертой в диссертационной работе является ориентация на исследование хаотических осцилляторов с различными характерными свойствами хаотической динамики – негиперболической и квазигиперболической – и анализ влияния этих свойств на формирование химерных структур. Изложение в работе ведется с позиций и в терминологии радиофизики (амплитудные и фазовые химеры, влияние шумов на устойчивость структур, поиск языков синхронизации) на физическом уровне строгости с конкретными теоретико-колебательными интерпретациями. Это отличает диссертационную работу от многих других, в частности, от тех, которые больше ориентированы на математические и численные аспекты проблемы. В этом отношении практическая значимость работы состоит в возможности применения ее результатов в различных научных отраслях при исследовании и моделировании сложных сетей, состоящих из большого числа существенно нелинейных активных элементов и демонстрирующих нетривиальные динамические режимы. В качестве примеров можно указать разнообразные большие системы (сети) из области нейронауки и энергетики, которые в последние годы исследуются с точки зрения теории сложных сетей. Таким образом, диссертационная работа представляет интерес для широкого круга физиков, особенно специалистов в области радиофизики и нелинейной динамики. В связи со всем сказанным тема диссертации актуальна и соответствует специальности 01.04.03 – «радиофизика».

Внутренне единство и цельность диссертационной работы обусловлены тем, что в центре внимания всегда находятся ансамбли колебательных хаотических систем, которые являются базовыми в радиофизике и нелинейной динамике – логистические отображения, отображения Эно, отображения Лози. В силу относительной простоты (элементарности) этих систем автору удастся достичь конкретных интересных результатов по обнаружению и объяснению химерных структур и других динамических режимов. Той же простотой обоснована и высокая степень общности полученных результатов. Для подтверждения этой общности автором проводится сравнение с ансамблями, состоящими из более сложных систем, таких, как генератор Анищенко – Астахова, модельное отображение нейрона и др. С учетом этих соображений и теоретических аспектов работы достоверность и обоснованность основных результатов диссертации продемонстрированы вполне убедительно. Эти результаты состоят в следующем.

В первой главе проведено исследование динамики нелокально связанных систем с негиперболическим хаосом при переходе от режима полной хаотической синхронизации (полная когерентность по терминологии автора) к пространственно-временному хаосу (полностью некогерентный режим). Введены основные средства исследования – мгновенные профили, пространственно-временные профили, коэффициент взаимной корреляции. Выяснены условия для возникновения фазовой химеры (с некоторой конечной точностью это – почти периодический во времени режим) и амплитудной химеры (развитые хаотические колебания с конечным, хотя и достаточно большим, временем жизни). Амплитудная химера в таких системах обнаружена впервые в диссертационной работе. Аналогичные режимы найдены в ансамблях отображений Эно и генераторов Анищенко – Астахова, что позволило автору обосновать наличие фазовой и амплитудной химер при переходе когерентность – некогерентность в ансамблях нелокально связанных систем с удвоением периода. Пояснено, что химерные структуры существенно связаны с многообразной мультистабильностью в ансамбле, а реализация той или иной химерной структуры существенно зависит от начальных условий. Тем не менее, результаты достаточно типичны, т.к. получены для некоторых наборов случайно заданных начальных условий в ансамбле.

Во второй главе для ансамблей осцилляторов с квазигиперболическим хаосом (отображения Лози и системы Лоренца) проведено аналогичное исследование перехода когерентность – некогерентность. Показано, что в этом случае реализуются режимы уединенных состояний, когда отдельные осцилляторы, не образующие кластера, демонстрируют поведение, отличное от всего остального ансамбля, разделенного на кластеры когерентности. Показано, что при уменьшении силы связи в ансамбле хаотических отображений Лози переход к некогерентности происходит через увеличение количества осцилляторов, находящихся в режиме уединенных состояний. Для ансамбля систем Лоренца получен тот же результат, но кроме него наблюдались и другие режимы, в том числе, химерные структуры, несмотря на то, что для систем с квазигиперболическим аттрактором химерных структур быть не должно из-за отсутствия мультистабильности. Автором дано объяснение, состоящее в том, что при введении связи меняется тип аттрактора (в том числе, его проекции на фазовое пространство индивидуального осциллятора) – аттрактор становится негиперболическим. Это достаточно просто и убедительно пояснено изменением эффективных значений параметров индивидуального (точнее было бы сказать – парциального, как это сказано в последующих главах) осциллятора. Таким образом, во второй главе обоснован переход к некогерентности в ан-

самблях осцилляторов с квазигиперболическими аттракторами через увеличение количества осцилляторов в режиме уединенных состояний.

В третьей главе исследуется время жизни фазовой и амплитудной химер и их устойчивость к возмущениям, в том числе к шуму с различными параметрами. Численно показано, что фазовая химера представляет собой установившийся режим, а амплитудная – переходный процесс, но возможно очень длительный (сотни тысяч итераций или характерных периодов колебаний). При этом временная реализация осциллятора из некогерентного кластера амплитудной химеры представляет собой перемежающиеся переключения между почти периодическим режимом и развитым хаотическим режимом, с изменением длительности каждой из фаз по мере установления итогового режима, которым оказывается почти периодический режим фазовой химеры. Показано, что воздействие шума в течение короткого интервала времени может привести к восстановлению амплитудной химеры. При этом постоянно действующий шум приводит лишь к некоторому возмущению поведения фазовой химеры и не индуцирует амплитудную химеру. Таким образом, показана грубость (в некотором привычном практическом смысле) фазовой и амплитудной химер, а также условия их существования при наличии возмущений, в том числе возможность увеличения времени жизни режима амплитудной химеры за счет введения редких возмущений состояния ансамбля.

В четвертой главе исследуются два связанных ансамбля (слоя) хаотических отображений с различными типами аттрактора, а именно, ансамбль отображений Эно и ансамбль отображений Лози. Рассматриваются два типа межслойной связи – инерционная и диссипативная, при этом она локальная и симметричная (мультиплексная), в отличие от нелокальной связи внутри каждого из ансамблей. Показано, что в каждом ансамбле может наблюдаться режим, который не наблюдался в изолированном случае. В ансамбле отображений Эно наблюдаются режимы уединенных состояний и бегущих волн, а ансамбле отображений Лози – фазовая и амплитудная химеры. Показано, что при уменьшении межслойной связи в ансамбле отображений Эно возникает новый тип химерной структуры, которая названа химерой уединенных состояний и соответствует ситуации, когда некогерентный кластер состоит из осцилляторов, находящихся в режиме уединенного состояния. Далее показано, что такая структура реализуется и в изолированном ансамбле отображений Эно при воздействии мультипликативным шумом на параметр нелокальной связи, а также без воздействия шума. Показано, что причиной ее возникновения является появление бистабильности в динамике парциальных осцилляторов ансамбля. Проведено численное исследование бассейнов притяжения сосуще-

ствующих режимов. Показано, что аналогичный механизм возникновения химеры объединенных состояний имеет место в ансамблях отображений Некоркина (модель нейрона) и систем ФитцХью – Нагумо.

В пятой главе проведено исследование взаимной и вынужденной синхронизации различных (в том числе химерных) структур в двух мультиплексно связанных ансамблях логистических отображений с нелокальной связью внутри каждого ансамбля. Рассмотрены диссипативный и инерционный типы межслойной связи, исследовано влияние расстройки различных параметров систем (параметра нелинейности индивидуального осциллятора и коэффициента нелокальной связи) на существование и устойчивость режима синхронизации. Аналогичные расчеты проведены для связанных ансамблей отображений Эно и Лози. Показано, что имеют место эффекты вынужденной и взаимной синхронизации химерных (и других) структур в двух ансамблях, причем они наблюдаются в некоторой области на плоскости параметров «связь – расстройка индивидуальных параметров». Обсуждено соответствие «языка синхронизации» для исследуемых ансамблей с выводами классической теории синхронизации автоколебательных систем. Показано, что синхронизация в исследуемых системах достигается лишь при диссипативной связи.

В шестой главе показана возможность передачи химерной структуры в многослойной мультиплексной сети от одного слоя осцилляторов (источника) к последующим, которые связаны между собой однонаправленно или взаимно. Источник влияет на последующий слой только однонаправленно. Показана возможность такой передачи, т.е. вынужденной синхронизации все более удаленных слоев сети с источником (с некоторой конечной точностью). Исследовано влияние расстройки (неоднородности) параметров слоев (индивидуального параметра нелинейности и коэффициента нелокальной связи), а также наличия обратной связи, на установление режимов синхронизации. Показана возможность передачи химерной структуры в присутствии неоднородностей по различным параметрам и при наличии обратной связи. Показано, что эффект вынужденной синхронизации многослойной сети в режиме химерной структуры характеризуется различием в порогах синхронизации для кластеров некогерентности фазовой и амплитудной химер. Показано, что расстройка значений параметров нелинейности существенно сильнее (разрушительнее) действует на режимы синхронизации, чем расстройка параметров нелокальной связи. Еще сильнее сказывается на режиме синхронизации наличие обратной связи. В целом в шестой главе показана возможность передачи химерной структуры в многослойной сети и найдены соответствующие условия.

В диссертационной работе привлекает четкая форма и стиль изложения результатов: все изложено систематично, ясно, хорошим научным языком. В рамках оригинальной линии исследований автора, ориентированной на нелокально связанные ансамбли хаотических осцилляторов с тем или иным видом хаоса, получен целый ряд новых ценных результатов: амплитудная химера и условия ее существования наряду с фазовой химерой, влияние шума на обе структуры и характерное время их жизни; связь между типом хаотического режима и возможным механизмом перехода когерентность – некогерентность (через фазовую и амплитудную химеры для негиперболического хаоса, через режимы уединенных состояний для гиперболического хаоса); введено понятие химеры уединенных состояний и др. Все основные результаты являются новыми. Большинство результатов имеет фундаментальное значение, внося большой вклад в развитие теории колебаний в пространственно-распределенных системах. Имеется и весомое прикладное значение для моделирования реальных систем: так, помимо сказанного выше, результаты пятой и шестой глав по синхронизации и передаче информации в мультиплексных сетях потенциально полезны для исследования нейронных сетей, т.к. в последних при некоторых условиях наблюдаются схожие с химерными структурами пространственно-неоднородные режимы. Следует отметить большой объем проведенной теоретической и вычислительной работы, высокий научный уровень исследований, высокую квалификацию автора в области теории колебаний, нелинейной динамики и статистической радиофизики.

В качестве замечаний по диссертационной работе отмечу следующее.

1) Ряд определений в диссертационной работе вполне обоснованно опирается на приближенные количественные соотношения, например, определение синхронизации слоев в пятой и шестой главах, где приведен используемый количественный критерий. Однако не везде такие критерии указаны в явном виде:

- условие когерентного режима определяется близостью состояний соседних осцилляторов по формуле (1.4), но допустимая величина отклонения в этой формуле, используемая далее в конкретных расчетах, не указана;
- при описании фазовой химеры и границы соответствующего кластера некогерентности говорится об обращении в бесконечность пространственной производной мгновенного профиля (например, с. 61), но, видимо, имеется в виду теоретическое обоснование на пространственно-непрерывной модели, т.к. для дискретной системы можно говорить только о конечной разности и ее достаточно большом значении. Однако не указано, какое конкретно значение считается большим;

- при определении химеры уединенных состояний в главе 4 также остается не вполне ясным, по какому количественному критерию автор отличает ее от режима с большим количеством осцилляторов в уединенном состоянии;
- часто автор говорит, что в режиме фазовой химеры осцилляторы демонстрируют почти периодические колебания, хотя, строго говоря, режим в ансамбле хаотический с малым относительным отклонением временной реализации от некоторого (например, двухтактного) цикла. При этом не указано в явном виде, какой количественный критерий близости использовался.

2) Существенное затруднение при обосновании результатов может быть связано с сильной зависимостью поведения исследуемых систем от начальных условий. Автор подчеркивает, что в исследуемых системах наблюдаются химерные структуры, именно благодаря существенной мультистабильности. Наблюдение тех или иных структур при этом сильно зависит от начальных условий, которые задаются случайным образом. При этом остается не ясным, насколько легко воспроизводимы полученные химерные структуры и сценарии их возникновения и исчезновения. Нужно ли перебрать очень много начальных условий, чтобы найти химерную структуру (в соответствующей области пространства параметров) или при почти любых начальных условиях будет наблюдаться какая-то химерная структура, только при разных начальных условиях они будут разные? В каком смысле тогда восстанавливается амплитудная химера под действием шума (глава 3), так что удастся сколь угодно продлить время ее жизни, – восстанавливается одна и та же химерная структура или восстанавливается некоторая химерная структура, иная после каждого интервала воздействия шума? С анализом роли начальных условий связаны исследования бассейнов притяжения в главе 4, но и там исследуются условные бассейны притяжения, т.е. по переменным одного осциллятора при некоторых фиксированных начальных состояниях прочих осцилляторов.

3) Довольно спорным представляется утверждение о том, что эффект синхронизации химерных структур аналогичен классической теории синхронизации периодических автоколебаний, если понять такую аналогию в том смысле, что и там, и здесь наблюдается «язык синхронизации» на плоскости параметров (глава 5). Автор указывает, что для рассматриваемых ансамблей в одном «языке синхронизации» (рис.5.13) существуют различные режимы, так что имеет место синхронизация различных структур, тогда как в классической теории такой мультистабильной ситуации соответствовали бы различные языки синхронизации для различных периодических режимов. Хотя, конечно, есть аналогия в том смысле, что имеет место синхронизация в конечной области па-

раметров и в классической теории, и для рассматриваемых в работе структур. В той же главе (результат 3 на с.297) сказано, что «сравнительный анализ полученных результатов показал, что диссипативный тип связи между ансамблями хаотических осцилляторов в большей степени способствует реализации эффекта синхронизации химерных структур». Однако, согласно результатам, изложенным в главе 5, при инерционном типе связи автором вовсе не наблюдалось синхронизации химерных структур, так что точнее была бы и соответствующая формулировка.

4) Несколько представленных в этом пункте технических замечаний объединены темой не вполне удачного использования некоторых терминов:

- на стр. 142 говорится, что «в силу того, что химероподобное состояние имеет короткое время жизни ..., значения коэффициента взаимной корреляции можно оценить только приблизительно. Тем не менее, их распределение дает достаточно адекватное представление о статистической взаимосвязи колебаний осцилляторов ансамбля и понимание динамики ансамбля в целом». Но обычно в статистике говорят об оценке (которая, вообще говоря, почти всегда приближительна) некоторой величины, для которой известно истинное значение. Приблизительность связана с конечным объемом данных для оценивания. В данном же случае ситуация иная. Представляется, что сама характеристика, рассчитанная по формуле для коэффициента корреляции по короткому фрагменту данных, по определению не соответствует здесь некоторому обычному коэффициенту корреляции как нормированному моменту некоторого распределения. Ведь при усреднении по бесконечному времени обычный коэффициент корреляции между двумя рядами окажется, видимо, нулевым или очень малым для рассматриваемого примера, а не это представляет интерес для автора. Точнее было бы сказать, что не получена приближительная оценка традиционного коэффициента корреляции, а введена специальная характеристика взаимосвязей в исследуемой системе – случайная величина (т.е. статистика), реализация (т.е. конкретное значение) которой, представляет собой выборочный коэффициент корреляции для короткого фрагмента данных. Распределение вероятностей, особенно вероятности больших значений, этой величины не определяется в работе точнее, т.к. для качественного представления достаточно и отдельного выборочного распределения ее значений по ансамблю осцилляторов;
- на стр. 179 говорится, что «если распределение не симметрично относительно максимума, то медианное значение и среднее значение не совпадают». Точнее было бы сказать, что они могут не совпадать, т.к. можно указать и примеры, когда

для несимметричного относительно максимума распределения эти характеристики все же совпадают, хотя такие примеры и являются более специальными, не столь типичными;

- несколько раз без особой необходимости используется слово «абсолютно» в некотором не вполне определенном смысле, например, «очень» или «качественно» («последовательность положений центров колебаний является абсолютно случайной» на с.69, «значения их мгновенных амплитуд и фаз абсолютно не совпадают» на с. 141; «Абсолютно очевидно, что» на с.263; и др.). Лучше было бы его опустить или заменить более подходящим термином;
- на стр. 62 говорится, что «если сдвинуть временную реализацию 319-го элемента из области 2 на одну итерацию, то она полностью совпадет с временной зависимостью 318-го элемента из области 1 (см. рисунок 1.9,б)». Судя по рис.1.9,б, такого полного совпадения не будет. Возможно, имеется в виду совпадение с конечной точностью, или перепутаны рисунки, так что показан рисунок для цикла периода 4 вместо цикла периода 2, обсуждаемого в тексте;
- в главе 3 автор называет внешнее воздействие, осуществляющееся в течение одного дискретного момента времени, разновидностью шумового воздействия, хотя естественнее было бы назвать такое воздействие импульсным (пространственно неоднородный импульс воздействия).

Все представленные замечания не являются принципиальными и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы Г.И. Стрелковой. В заключение еще раз отмечу высокий научный уровень работы в целом, актуальность тематики, большой объем проведенных исследований, внутренне единство и обоснованность выводов работы, целый ряд новых, принципиально важных научных результатов, обладающих значительной фундаментальной и прикладной ценностью. Это подтверждается и высоким уровнем публикаций по результатам диссертации – более 30 статей в изданиях из Перечня Высшей аттестационной комиссии, более 20 статей в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, в том числе в таких авторитетных изданиях, как Известия вузов. Радиофизика, Chaos, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations, и др. Диссертация хорошо оформлена, автореферат соответствует содержанию диссертации. Результаты работы могут найти приложения при анализе данных о поведении сложных систем из области геофизики, биомедицины и др. Они могут быть использованы при проведении научных исследований в академических НИИ (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ИПФ РАН и др.) и при преподавании стати-

