

ОТЗЫВ

официального оппонента Макаренко Николая Григорьевича на диссертационную работу *Сидак Елены Владимировны*

"Методы интервального оценивания характеристик связи между осцилляторами по временным реализациям фаз колебаний",

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиопизика

Актуальность темы диссертации

Считается, что исследование синхронизации началось в 1665г., когда Христиан Гюйгенс наблюдал возникновение коллективного поведения в системе двух слабо связанных маятниковых часов. Спустя столетие, в 1784г., синхронизация была описана Лапласом в задаче малых знаменателей – резонансных соотношений, которые возникают в рядах описывающих возмущенное движение планет (Brown, E.W., Elements of the Theory of Resonance, 1932).. Интересно, что резонансы в системе многих тел иногда связывают с эволюционной зрелостью системы (Молчанов А.М. //Icarus, 1968, 8, 203). Оказалось, например, что для девяти планет Солнечной системы (Плутон тогда считался планетой) можно написать восемь резонансных соотношений, которые выполняются с точностью ~1%. Насколько мне известно, эта парадоксальная гипотеза до сих пор не опровергнута, хотя и не доказана.

Наблюдения над захватом частоты в системе нелинейных слабо связанных электронных и механических осцилляторов показали, что их взаимодействие при захватывании асимметрично, т. е. один осциллятор «захватывает» другой и заставляет его колебаться синхронно с собой. Как установил Прингл (Pringle, J. W. S.// Behaviour, 1951, 3, p.174.), роли «хищника» и «жертвы» в таких системах распределяются в зависимости от того, с какой стороны частота одних колебаний приближается к частоте других. В итоге, им была предложена чрезвычайно интересная модель, основанная на параллели между динамикой системы связанных осцилляторов и эволюцией популяций организмов в природе. Существенный прогресс в математическом описании явлений синхронизации был связан с методами нелинейной динамики.

Понятие обобщенной синхронизации (Rulkov et al., // Phys. Rev. E. 1995, 51, 980) расширило возможности описания взаимодействия двух динамических систем, обладающих свойствами рекуррентности. Используя их реконструкции по Такенсу, из временных рядов, были предложены меры для оценки взаимной связи основанные на корреляционных суммах (Grassberger P., et al. // Nonlinearity, 1997, 10, 749). Появились даже попытки определить систему - драйвер в случае однонаправленной связи, используя асимметрию некоторых корреляционных оценок. Другим вариантом тестирования связей были нелинейные обобщения AR-прогностических схем Грэнджера (Diks, C., & Panchenko, V. // J. Econ. Dyn. and Cont., 2006, 30, 1647).. Прогностические схемы связаны с свойствами обратимости, а диагностировать это свойство в временных рядах совсем непросто (Diks, C. Nonlinear time series analysis: methods and applications. 1999, V.4. World Scientific). С другой стороны, исследования простых моделей хаотической динамики показало, что необратимые системы, или системы без явных симметрий приводят к чрезвычайно сложным множествам синхронизации. В них могут возникать негладкие и даже некаузальные конструкции (Barreto E. et al. // Chaos, 2003, 13, 151).

Изложенное выше примеры иллюстрирует широкий класс интереснейших теоретических проблем, связанных с явлением синхронизации. Они обеспечивают **теоретическую актуальность** выбранной области исследования.

Однако, как и в любой другой области знания, всегда важен еще и прикладной аспект. В нем часто возникают задачи, которыми приходится заниматься *по необходимости*. В случае синхронизации, такие задачи усложняются разными типами синхронизации и огромным разнообразием динамических систем. Так, из большого разнообразия связей в нелинейных осциллирующих системах наиболее интересной и простой для практики является фазовая синхронизация. Известно, что фаза обладает высокой чувствительностью к внешним воздействиям и позволяет оперировать моделями малой размерности. Кроме того, ее несложно ввести используя аналитическую форму сигнала, либо, для реконструкций, используя координаты сохраняющие вращательные симметрии. Ее исследование в радиофизике восходит к пионерской работе Роберта Адлера, эксперименты которого с связанными генераторами, привели к знаменитому уравнению описывающему фазовую синхронизацию (Adler, R. //Proc. of the IRE 1946, 34, 351). В большинстве случаев, однако, ограничиваются вычислением меры связи, без каких либо статистических оценок возможных погрешностей. Если учесть, что экспериментальные ряды часто являются весьма короткими, отличить истинную связь от статистической флуктуации практически невозможно. Поэтому, было бы крайне желательно наделять численные оценки наличия синхронизации оценками их статистической достоверности. Иными словами, попытаться решать обратные задачи синхронизации в рамках классической теории правдоподобия Крамера-Рао. Эта проблема имеет очевидную **практическую актуальность**. Именно ей и посвящена диссертация Елены Владимировны. В типичном случае отсутствия универсальных мер, совсем непросто подобрать эталонные системы даже для выбранного типа синхронизации. Если учесть, что даже различный тип шума влияет на результат диагностики, понятно сколь велики трудности, которые стояли перед соискательницей.

Заявленная **цель диссертационной работы** состоит в разработке методов, позволяющих на основе анализа фазовой динамики выявлять связь и оценивать время ее запаздывания с доверительными интервалами полученными в рамках теории правдоподобия Крамера-Рао. Насколько следует из текста диссертации, рассмотрение ограничено колебательными системами допускающими модель фазовой синхронизации и гауссоподобными шумами.

Для достижения цели соискательница решала следующие основные задачи (в авторской редакции):

1. *Разработка метода обнаружения связи между осцилляторами с аналитической оценкой статистической значимости, применимого для широкого круга колебательных систем.*

2. *Разработка метода интервального оценивания времени запаздывания связи на основе моделирования наблюдаемой фазовой динамики для осцилляторов, которые представляет собой слабо возмущенные предельные циклы.*

3. *Разработка метода интервального оценивания времени запаздывания связи на основе моделирования фазовой динамики, применимого для осцилляторов с различными свойствами динамики, включая хаотические режимы нелинейных низкоразмерных систем и ситуации больших амплитудных флуктуаций.*

Все перечисленные задачи вполне обоснованы и минимально необходимы для достижения цели.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов

К числу наиболее существенных результатов диссертации следует отнести:

1) Предложенный метод выявления связи между осцилляторами, основанный на корреляции стационарных приращений фаз, снабженный аналитической оценкой уровня статистической значимости. Его специфической особенностью является повышенная чувствительность к связям сохраняющим степень синхронности колебаний и применимость в ситуации фазовой нелинейности. Его эффективность слабо зависит от сокращения длины временного ряда и близости режима наблюдаемой динамики к синхронному. *Метод является новым.*

2) Метод позволяющий получать несмещенные точечные оценки запаздывания связи между стохастическими фазовыми осцилляторами первого порядка, вместе с доверительным интервалом для величины запаздывания. Оценки основаны на асимптотическом формализме максимального правдоподобия. *Метод является новым и применим при различных корреляционных свойствах случайных внешних воздействий.*

3) Предложенный новый «огрубленный» метод интервального оценивания времени запаздывания связи между колебательными системами с значительными амплитудными флуктуациями вызванных динамическим или внешним шумом.

4) Новая оценка запаздывания полученная для связей между крупномасштабными климатическими процессами планетарного масштаба: Эль-Ниньо – Южное колебание и Северо-Атлантическое колебание (САК). Оказалось, что глобальное колебание - Эль-Ниньо управляет САК с запаздыванием не менее 8 месяцев. Оценка получена асимптотическим и огрубленным методами и дополняет прежние точечные оценки этой величины, которые составляли ~2 года.

Личный вклад соискательницы заключался в создании компьютерных программ для реализации всех описанных в диссертации методов, проведение численных экспериментов и сравнительного анализа известных ранее и вновь предложенных методов, анализ реальных данных. Кроме того, Елена Владимировна принимала активное участие в разработке теоретической основы методов оценки связей.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений

Достоверность научных выводов обусловлена теоретическим контекстом предложенных соискательницей методов оценки связей основанным на теории колебаний и математической статистики, результатами компьютерных экспериментов на эталонных динамических системах, согласованием результатов численных расчетов и аналитических выводов и совпадением ряда результатов с аналогами, полученными другими авторами.

Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

Научное значение полученных в диссертации результатов состоит прежде всего в том, что они показывают принципиальные возможности достоверного выявления связи и ее запаздывания по временным рядам фаз колебаний для широкого класса динамических систем, продуцирующих эти ряды в рамках статистической радиофизики и теории правдоподобия Крамера-Рао.

Практическое значение результатов состоит в том, что предложенные методы позволяют получать надежные выводы о связях между колебательными процессами

различной физической природы в реалистичных условиях коротких временных рядов (несколько десятков характерных периодов) с минимальным объемом расчетов (за счет полученных аналитических выражений для доверительных интервалов и уровней значимости выводов). Последнее позволяет проводить анализ больших объемов данных за умеренное время, что расширяет круг возможных приложений к решению, в частности, биомедицинских задач, связанных с анализом колебательных процессов.

Замечания по диссертационной работе в целом

1. В диссертации подробно описаны, в качестве примеров, набор тестовых систем для которых разрабатывались интервальные оценки. Для практики, *ограничения* любого нового метода более важны, чем его преимущества. Поэтому, было бы уместно в постановочной части диссертации или в Заключение, уточнить класс систем и/или динамические режимы, для которых интервальные оценки не применимы, либо не эффективны.

2 Квадратичный функционал, который используется в разделе 2.2. (стр.63) для получения запаздывания не гарантирует в общем случае единственного решения. Следовало бы уточнить класс функций, в котором он позволяет получить корректную оценку. Мне кажется, что здесь мог бы оказаться полезным принцип минимальной длины описания Риссанена (Grünwald, P "Advances in Minimum Description Length: Theory and Applications". 2005. MIT Press). Для квазилинейного варианта он позволяет получить второй функционал.

3 В разделе 3.2 использовано некорректное описание для огрубленной оценки ширины минимума. Предложенная ширина графика «на срединном уровне» для области «явного глобального минимума) никак не обосновывается. Глобальный минимум, судя по тексту на стр.89, предполагается Морсовским и естественно должен аппроксимироваться параболой, согласно лемме Морса. Но тогда, минимум «неправильной» формы нарушает принцип общего положения. Мера пересечения «срединного» уровня с графиком, суммированная по высоте измеряется длиной графика или полной вариацией функции. Но каком смысл одного срединного уровня и как его выбирать? Мне кажется, здесь стоило бы уточнить терминологию.

4. Терминологические неточности в Заключение самой Диссертации (стр.104) и в автореферате (стр.19). Предложение «*За счет менее специфических предположений о характере динамики исследуемых систем (достаточным условием является стационарность приращений фаз) он применим в более широком круге ситуаций: при более коротких рядах, при наличии сколь угодно сильной собственной фазовой нелинейности, в режимах сколь угодно близких к синхронному*» вызывает больше вопросов, чем содержательных утверждений. Что такое «более широкий круг ситуаций», каков количественный смысл «более коротких рядов», что означает «сколь угодно сильная» фазовая нелинейность и чем режим «сколь угодно близкий к синхронному» отличается от собственно синхронного?

5. Следовало бы отметить особенности применения понятия фазовой синхронизации к природным временным рядам в разделе 3.4. Действительно, в теории аналитического сигнала довольно просто ввести огибающую аналитического сигнала, как переменную амплитуду, мгновенную частоту и мгновенную фазу. Однако, для реальных природных процессов необходимы дополнительные физические соображения о существовании механизмов реализующих *параметризованное семейство* кривых как компонент модулирующего воздействия. Так например, понятие огибающей до сих пор не удалось корректно ввести для 11-летних солнечных циклов.

6. Приращение фаз, введенное в разделе 1.2 является, фактически, квадратным корнем из вариограммы, хорошо известной в кригинге (Демьянов В., Савельева Е. Геостатика: теория и практика, Наука, 2010).

Замечу, что все отмеченные недостатки носят методический характер и не влияют на общую характеристику работы.

Общая характеристика диссертационной работы

В целом, несмотря на отмеченные замечания, представленная диссертация Сидак Елены Владимировны выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно- квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, связанную с разработкой, теоретическим и экспериментальным обоснованием новых методов диагностики фазовой синхронизации колебательных систем снабженных оценками статистического правдоподобия

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли достаточную апробацию на всероссийских школах и международных конференциях, и опубликованы в 30 научных трудах соискателя, в том числе 10 статьях в журналах, рекомендованных ВАК.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.8 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор - Сидак Елена Владимировна безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук специальности 01.04.03 – Радиофизика

Официальный оппонент г.н.с. ГАО РАН, доктор физ.-мат. наук, зав.сектором Математического Моделирования ГАО РАН

Н.Г.Макаренко,

Рабочий адрес

196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское Шоссе 65/1,

тел. 8 (911) 1716577,

эл. адрес: ng-makar@mail.ru

Ученый секретарь ГАО РАН
к.ф.-м.н.



Т.П.Борисевич