

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию

Корнилова Максима Вячеславовича

«Оценка связанности колебательных систем методом причинности по Грейнджеру при использовании моделей с полиномиальной нелинейностью»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиопизика

Во многих приложениях современной радиопизики (включая задачи нейрофизиологии, климатологии, биомедицины) оказывается невозможным исчерпывающее описание исследуемого объекта с помощью моделей, построенных на основе первых принципов, – в силу сложности объекта, недостатка информации о его структуре или при наличии параметров, не наблюдаемых напрямую. Основным источником информации об объекте в этих случаях служат временные ряды – последовательности измеренных значений величин, поддающихся наблюдению. В случаях, когда динамика исследуемого объекта достаточно проста, может оказаться достижимым построение более или менее точной эмпирической динамической модели объекта на основе временных рядов. Если же имеющаяся информация недостаточна для полной реконструкции динамики, ставятся более простые задачи – например, выявление связей между отдельными подсистемами, составляющими сложную систему, а также определение направленности воздействия.

К числу основных подходов для выявления направленности взаимодействий по временным рядам относится метод причинности по Грейнджеру. В рамках этого метода вводится некоторый класс эмпирических моделей динамики, в котором отыскиваются оптимальные модели, минимизирующие ошибку предсказания по имеющимся временным рядам, при этом задача оптимизации ставится двумя способами: (а) по наблюдаемым данным, относящимся только к одной подсистеме, и (б) по данным, относящимся к двум подсистемам, между которыми требуется выявить взаимодействие. После этого сравниваются ошибки предсказания эмпирических данных для двух найденных оптимальных моделей. Если модель, найденная по данным для двух подсистем, оказывается более точной, то говорят об «улучшении прогноза».

В идеализированной ситуации, когда эмпирические данные абсолютно точны и полностью описывают состояние исследуемых подсистем, такое улучшение прогноза свидетельствует о наличии воздействия второй системы на первую. Поскольку в реальности эти условия никогда не реализуются (эмпирические данные имеют конечную точность и всегда неполны в силу дискретности временных отсчетов и наличия ненаблюдаемых переменных), получение достоверного заключения о наличии и направленности связи на основе наблюдаемого улучшения прогноза в рамках метода причинности по Грейнджеру составляет отдельную научную проблему, которая к настоящему времени в общем виде не решена и весьма актуальна.

Диссертация Корнилова М.В. вносит вклад в решение ряда вопросов, представляющих важность с точки зрения указанной проблемы, а именно: выбор класса моделей, в котором в рамках метода причинности по Грейнджеру производится отыскание оптимума; выбор дальности прогноза модели и временного интервала (лага) между отсчетами, на основе которых строится прогноз; оценка значимости наблюдаемого улучшения прогноза на основе различных суррогатных временных рядов; оценка эффективности метода вблизи перехода к режиму синхронизации (определяющему принципиальный предел применимости метода). Вышесказанное позволяет сделать однозначное положительное заключение об *актуальности* темы диссертации и её *соответствии специальности 01.04.03 – радиопизика*.

Исследование проводится с помощью численного моделирования. В качестве источника временных рядов используются многочисленные и разнообразные тестовые динамические модели, демонстрирующие хаотическую динамику (отображения Эно, окружности, Заславского и др., модели Лоренца, Ресслера, Анищенко-Астахова и др.).

В первой главе ставится вопрос о выборе класса моделей для определения причинности по Грейнджеру. Рассматриваются полиномиальные модели различных степеней. Центральный результат состоит в том, что требование качественного воспроизведения моделью характера динамики, наблюдаемого по эмпирическому временному ряду, оказывается несущественным при выборе класса прогностических моделей для определения причинности по Грейнджеру. Иными словами, пригодность модели для качественного описания динамики и для определения причинности по Грейнджеру не эквивалентны и, вообще говоря, не связаны друг с другом. Также показано, что слишком высокая степень полинома может приводить к нефизичным результатам вследствие «эффекта переобучения», хорошо известного в теории машинного обучения.

Вторая глава посвящена подбору оптимальных временных параметров прогностической модели (дальности прогноза модели и временного интервала (лага) между отсчетами, на основе которых строится прогноз) применительно к колебательным процессам, обладающим выраженным временным масштабом. Вообще, постановка задачи оптимизации требует формулировки целевой функции – величины, которая должна быть минимизирована или максимизирована. Автором введены в рассмотрение две такие целевые функции, интегрально характеризующие применимость метода причинности по Грейнджеру (включая такие показатели, как чувствительность, специфичность и значимость) на всём допустимом интервале значений параметра связи от нуля до значения, при котором наступает синхронизация. На основе предложенных критериев сформулированы рекомендации по оптимальному выбору временных параметров прогностических моделей.

В третьей главе результаты, полученные в первых двух главах, применяются для анализа применимости метода причинности по Грейнджеру вблизи естественного предела его применимости, определяемого переходом к режиму синхронизации. Показано, что в режиме фазовой синхронизации метод в принципе может быть применимым, в то время как известно, что при полной или обобщённой синхронизации метод неприменим принципиально. Вопрос о точных условиях применимости метода при фазовой синхронизации оставлен открытым, но показано, что старший ляпуновский показатель, по-видимому, не является определяющим фактором. Показано также, что различные методы генерации суррогатных временных рядов для оценки значимости дают близкие результаты.

Отметим, что само по себе исследование, выполненное в диссертации, ограничено двумя факторами. Во-первых, в качестве источника временных рядов используются только тестовые численные модели (применение рассматриваемых методов к анализу реальных временных рядов даётся только в приложении). Во-вторых, рассматриваются только полиномиальные прогностические модели. Несмотря на это, можно утверждать, что результаты этого исследования обладают существенно большей общностью. Так, в силу соответствия между результатами, полученными для тестовых моделей, демонстрирующих разнообразную динамику (различные значения старшего ляпуновского показателя, разный вид автокорреляционной функции) следует ожидать хорошей универсальности этих результатов и применительно к реальным временным рядам.

Кроме того, поскольку рекомендации, сформулированные по результатам второй главы, относятся только к временным параметрам моделей и не привязаны к конкретному (полиномиальному) классу моделей, можно ожидать их универсальной применимости к любым колебательным процессам с выраженным временным масштабом независимо от

используемого класса моделей. Эта универсальность, однако, в работе не проверялась и, по-видимому, может составить предмет отдельного исследования.

Результаты диссертации в должной степени *обоснованы*, являются *новыми* и *значимыми* для практических применений, представляя существенный вклад в арсенал методов анализа временных рядов.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы основывается на соответствии результатов, полученных с использованием многочисленных тестовых численных моделей и на отсутствии противоречий с имеющимися в литературе результатами, ранее полученными в этой области.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Основные результаты диссертации представлены в 14 научных публикациях, в числе которых 3 статьи в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Результаты диссертации могут найти применение в исследованиях, требующих выявления направленности взаимодействий между подсистемами на основе наблюдаемых временных рядов – например, при анализе электроэнцефалограмм и других записей нейронной активности, при анализе погодных данных и т. п. Результаты работы *рекомендуются к использованию* в организациях, занимающихся проблемами нелинейной динамики сложных систем (ИПФ РАН, ИФМ РАН, ИРЭ РАН, СГУ, ННГУ и др.), в том числе, в учебном процессе в программах специальных учебных дисциплин соответствующей тематики.

Замечания по диссертации носят в основном технический характер, а именно:

1. Во всех численных экспериментах производилось отсечение переходного процесса до установления стационарного режима, однако в работе указывается только продолжительность переходного процесса и не уточняется критерий, по которому определяется установление стационарного режима.
2. В главе 1 в разделе, посвященном связанным системам Лоренца, приведенные данные о размерности моделей представляются противоречивыми, а именно: в подписи к рисунку 1.8 указана размерность совместной модели, равная 2 для случаев (a) и (c), и 4 для (b) и (d); в тексте указывается, что индивидуальная и совместная (читать – добавочная?) размерности равны 1 для (a) и (b), и 2 – для (c) и (d); в подписи к рис. 1.9 указывается индивидуальная размерность 4 и добавочная размерность 1.
3. В главе 2 в разделе, посвященном связанным системам Рёсслера (стр. 47), для наборов параметров 1 и 2 указываются значения старшего ляпуновского показателя 0.6 и 0.8 (читать 0.06 и 0.08 ?). Там же перепутаны местами ссылки на рис. 2.2 (a)–(d) (автокорреляционные функции) и рис. 2.2 (e)–(h) (спектры мощности). На рис. 2.3 отсутствуют обозначения (a) и (b).
4. В главе 2 зачастую не указывается степень использованных полиномиальных моделей. Точнее говоря, степень указывается только при перечислении различных сочетаний размерности модели и степени полинома, для которых получены аналогичные результаты; из этого, однако, не ясно, какие степени полинома использовались в конкретных расчетах, результаты которых представлены на рисунках 2.2–2.8.
5. Работа не свободна от опечаток.

Указанные замечания не касаются основных идей и результатов автора, изложенных в диссертации, и не снижают высокой оценки научного уровня проведенных исследований и общего хорошего впечатления от диссертационной работы.

Представленная диссертация является *научно-квалификационной работой*, в которой содержится *решение актуальной задачи* оценивания связанности колебательных систем по наблюдаемым временным рядам, имеющей существенное значение для развития радиофизических методов анализа экспериментальных данных. Работа обладает *внутренним единством*, представленные результаты являются *новыми*, должным образом *аргументированы* и оценены по сравнению с другими известными решениями и свидетельствуют о *личном вкладе* автора диссертации в науку.

Диссертационная работа Корнилова М.В. удовлетворяет критериям, установленным пп. 9–14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» (в ред. Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842) для кандидатских диссертаций и соответствует специальности 01.04.03 – радиофизика. Автор работы, Корнилов Максим Вячеславович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Доцент кафедры теории колебаний и автоматического регулирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (Россия, 603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23; эл. почта: okanakov@rf.unn.ru ; тел. (831) 465-62-42), кандидат физико-математических наук,

Канаков Олег Игоревич

Подпись Канакова Олега Игоревича заверяю, учёный секретарь Учёного совета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», кандидат социологических наук.



Черноморская Лариса Юрьевна

29.04.2015