

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук профессора
Парфенова Владимира Ивановича
на диссертацию Симонова Романа Валерьевича на тему «Развитие
оптимальных методов обработки ультразвуковых сигналов», представленную
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.4 – Радиофизика

1. Актуальность и общая характеристика работы

В современной науке и технике существует устойчивый тренд на преодоление фундаментальных ограничений, казавшихся неизбежными на протяжении десятилетий. Одним из таких ограничений в области обработки сигналов является так называемый «релеевский предел» разрешения, тесно связанный с классическим соотношением неопределённости. Этот предел исторически определял возможности спектрального, корреляционного и углового анализа в самых разных приложениях – от радиолокации и гидроакустики до медицинской визуализации и дефектоскопии. Попытки преодолеть его часто имели эвристический характер и не были основаны на строгой статистической теории. Диссертационная работа Р.В. Симонова посвящена решению именно этой фундаментальной проблемы, но сфокусированной на особом классе сигналов – ультразвуковых. Актуальность данного направления сложно переоценить. Ультразвуковые технологии прочно вошли в нашу жизнь: это и диагностика в медицине, и контроль качества материалов в промышленности, и системы навигации под водой. Однако физические ограничения, связанные с резонансными свойствами пьезопреобразователей, частотной зависимостью затухания в средах и наличием структурных шумов, препятствовали развитию этих технологий. Дальнейший прогресс может быть основан не только на совершенствовании микроэлектроники или вычислительной техники, но в большей степени на усовершенствовании алгоритмов обработки информации.

Представленная работа является не просто инженерной разработкой, а глубоким теоретическим исследованием, направленным на слом

существующей парадигмы. Автор предпринял смелую и обоснованную попытку развития классической теории оптимального приема применительно к новому классу задач, характеризующихся высокой степенью неортогональности полезных сигналов.

Работа в полной мере соответствует специальности 1.3.4 – Радиофизика, поскольку её ядро составляет развитие методов статистической радиофизики для решения прикладных задач. Все поставленные цели и задачи носят системный характер и направлены на достижение конкретного, измеримого результата – создания технологии сверхразрешающей обработки сигналов.

2. Научная значимость и новизна работы

Научная ценность данного исследования, на мой взгляд, заключается в трёх ключевых результатах, каждый из которых вносит существенный вклад в теорию обработки сигналов.

Первый и наиболее фундаментальный результат – это строгое теоретическое обоснование ограниченности классических операторных методов. Автор не просто констатирует, что спектральный или корреляционный анализ плохо работают при малых отношениях сигнал/шум или для «близких» сигналов. Им проведён глубокий анализ, показывающий, что эти методы являются оптимальными (в смысле максимума отношения сигнал/шум на выходе) лишь в вырожденном случае – при наличии в реализации единственного сигнала, полностью согласованного с опорным. Как только в принятой реализации появляется несколько сигналов, а тем более в области их сильной корреляции (неортогональности), минимум функционала уже не достигает уровня дисперсии шума в принятой реализации, а оценки параметров становятся смещёнными и неэффективными. Этот вывод имеет далеко идущие последствия, так как ставит под сомнение универсальность соотношения неопределённости как абсолютного барьера. Оно оказывается не законом природы, а следствием применения конкретного, и притом ограниченного, класса методов обработки.

Второй результат – это преодоление принципиальной алгоритмической проблемы метода максимального правдоподобия. Хорошо известно, что

непосредственная максимизация функции правдоподобия для сигналов с неизвестным временем прихода существенно затруднена из-за обилия локальных экстремумов, создающих неоднозначность решений. Автор решает эту проблему, систематически применяя подстановку Хелстрема – процедуру аналитического исключения комплексных амплитуд из функционала. Это позволяет перейти к «гладкому» преобразованному функционалу правдоподобия, лишённому осцилляций, глобальный максимум которого уверенно оценивает неэнергетические параметры. Данный методический приём переводит метод максимального правдоподобия из разряда теоретически красивых, но сложно реализуемых методов в категорию рабочих инструментов.

Третий, и возможно, наиболее важный, результат – это обнаружение, теоретическое описание и разработка методов борьбы с феноменом сингулярных шумовых максимумов. Данное явление, ранее не учитывавшееся в литературе, возникает при решении задач для совокупности сигналов в области их сильной корреляции. В точках пространства параметров, где оценки для разных сигналов совпадают, корреляционная матрица уравнений правдоподобия становится сингулярной, а её обратные элементы стремятся к бесконечности. Это порождает острые «шумовые пики», амплитуда которых может на порядки превышать амплитуды полезных сигналов. Автор не только идентифицировал эту фундаментальную проблему, но и предложил эффективный метод её решения путём введения ограничения на минимальную разрешимую разность параметров и использования адаптивного порога, зависящего от коэффициента корреляции. Это позволило отсеять сингулярные выбросы и выделить истинные решения.

Комплекс этих трёх результатов образует новую, целостную технологию обработки, которая обеспечивает сверхрэлеевское разрешение. Важно подчеркнуть, что это не эвристика, а статистически обоснованная процедура, обеспечивающая несмещённые и эффективные оценки параметров в соответствии с границей Рао-Крамера, даже в условиях сильной взаимной корреляции сигналов.

3. Практическая значимость и потенциал внедрения

Практическая ценность работы носит междисциплинарный характер и затрагивает несколько критически важных технологических направлений.

В области медицинской ультразвуковой диагностики разработанные методы открывают путь к созданию систем визуализации с принципиально новым уровнем детализации. Возможность разрешения сигналов от близко расположенных тканевых структур, мелких сосудов или патологических образований на ранних стадиях может кардинально повысить эффективность неинвазивной диагностики. Особенно важно, что это достигается преимущественно за счёт совершенствования алгоритмов обработки, что позволяет модернизировать парк существующего диагностического оборудования без его дорогостоящей аппаратной замены. Это сулит значительный экономический эффект для системы здравоохранения.

В области дефектоскопии и неразрушающего контроля методы работы позволяют решать одну из самых сложных задач – обнаружение и идентификацию кластеров мелких дефектов в материалах со сложной внутренней структурой (композиты, крупнозернистые стали, полимерные конструкции). Алгоритмы раздельного обнаружения и оценки параметров совокупности сигналов, предложенные автором, позволяют получить информацию о близко расположенных дефектах, что напрямую влияет на безопасность и надёжность эксплуатации ответственных конструкций в авиастроении, энергетике и машиностроении.

В гидроакустике работа имеет двойное значение. Во-первых, это повышение разрешающей способности гидролокаторов, что критично для картографирования дна, навигации и классификации подводных объектов. Во-вторых, и это даже более важно, разработанные методы пространственно-временной обработки и фильтрации на фоне неортогональных помех позволяют эффективно бороться с реверберацией – основным источником помех в подводной акустике, возникающей за счёт многократных отражений от дна и поверхности.

Следует особо отметить, что автор не ограничился теоретическими выкладками и численным моделированием. В работе представлены

результаты успешных экспериментальных исследований на специально созданных макетах, которые подтвердили работоспособность алгоритмов и соответствие их характеристик теоретическим прогнозам. Это свидетельствует о высокой степени зрелости разработок и их готовности к переходу на стадию опытно-конструкторских работ.

4. Вопросы и замечания.

Данная диссертационная работа, впрочем, как и большинство других, не свободна от недостатков, среди которых следует выделить следующие:

1. Утверждается, что «в работе уточнены положения теории оптимального приема» применительно к ультразвуковой акустике. Хотелось бы более четко понять, что это за положения, за исключением понятия «сверхразрешения». Кроме того, многолучевость и межсимвольная интерференция – явления, свойственные не только ультразвуковой акустике, они встречаются и во многих других радиофизических приложениях.
2. К сожалению, в работе практически отсутствует сравнение в эффективности предлагаемых алгоритмов с уже известными. Так, если речь идет о «сверхразрешении», то интерес представляет сравнение с алгоритмами типа MUSUC или Annihilated Filter и др. Если речь заходит о борьбе с узкополосными помехами, то целесообразно сравнить достигаемый предложенным методом эффект подавления с известными методами (типа режекторной фильтрации).
3. В работе многие выводы и заключения выносятся по анализу очень ограниченного набора измерений. Так, например, вводятся в рассмотрение понятия «область оценок» (стр. 116), «пороговый уровень» (стр. 122) и др. В тоже время их выбор осуществлялся качественно по небольшому количеству данных. Или на стр. 127 из анализа рисунка, полученного по 25 реализациям, делается удивительный вывод: «Вероятность ложной тревоги близка к нулю, а вероятность обнаружения близка 100%». На стр. 158 утверждается, что «метод дифференциальной эволюции и метод перебора параметров по точности практически одинаковы». Однако этот вывод делается на основании

сравнения двух рисунков, полученных на основе моделирования на компьютере с непонятно сколькими реализациями.

4. При обработке ультразвуковых сигналов комплексная огибающая принятого сигнала может существенно отличаться от используемой в приемнике. Как при этом изменится эффективность приема, остается невыясненным.

5. Работа изобилует многочисленными ошибками и опечатками. Особенно часто не правильно указываются номера формул и рисунков.

5. Заключение и общая оценка

Диссертационное исследование Романа Валерьевича Симонова представляет собой пример синтеза фундаментальной науки и передовых инженерных решений. Автор продемонстрировал глубокое понимание как теоретических основ статистической радиофизики, так и специфических практических проблем ультразвуковой акустики.

Проведённая работа является законченным научным исследованием, в котором не только поставлена и решена крупная научная проблема, но и создан конкретный инструментарий для её практического применения. Полученные результаты обладают признанным научным приоритетом, что подтверждается публикациями в рецензируемых журналах и докладами на авторитетных конференциях.

Личный вклад соискателя является определяющим на всех этапах исследования: от постановки задач и теоретического анализа до разработки алгоритмов, программирования, создания экспериментальных макетов и проведения натурных испытаний.

Выводы диссертации логически вытекают из полученных результатов и аргументированно обоснованы. Работа, её содержание и оформление полностью соответствуют требованиям «Положения о присуждении учёных степеней».

Таким образом, диссертационная работа Симонова Романа Валерьевича «Развитие оптимальных методов обработки ультразвуковых сигналов» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной под

руководством доктора физико-математических наук, профессора Пахотина В.А., в которой содержится решение научной задачи – развитие теории оптимального приема применительно к ультразвуковой акустике, имеющей существенное значение для радиофизики. По своей актуальности, новизне, научно-практической значимости диссертация Симонова Романа Валерьевича «Развитие оптимальных методов обработки ультразвуковых сигналов» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук согласно п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013г. (в действующей редакции), а автор Симонов Роман Валерьевич достоин присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

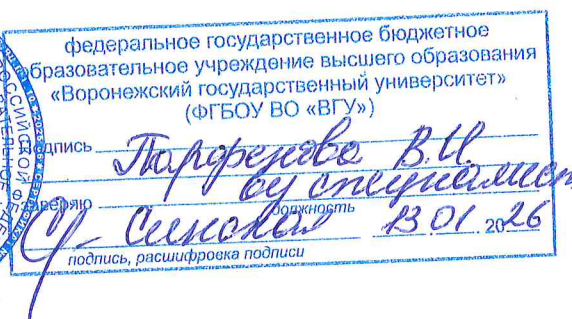
Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры
радиофизики Воронежского
государственного университета



Парфенов В.И.

«13» января 2026 г



Парфенов Владимир Иванович; д.ф.-м.н.; специальность 01.04.03 – Радиофизика; рабочий адрес: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1; тел.: +7(473)220-75-21; e-mail: office@mail.vsu.ru; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»; профессор; профессор кафедры радиофизики физического факультета ВГУ.