

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.03, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО"
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 28.09.2022 г. № 45

О присуждении Шмонину Олегу Андреевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка методов двумерного углового разрешения источников излучения в адаптивных антенных системах» по специальности 1.3.4 – Радиофизика принята к защите 4 мая 2022 г., протокол № 36, диссертационным советом 24.2.340.03, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, приказом Рособрнадзора № 1990-1015/130 от 4 сентября 2007 г.

Соискатель, Шмонин Олег Андреевич, 11 июля 1996 года рождения, окончил с отличием специалитет радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского в 2019 году. С 2019 по настоящее время обучается в аспирантуре Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, направленность 01.04.03 «Радиофизика». Работает старшим инженером в МИП ООО «Радио Лаб НН». С сентября 2022 года по настоящее время работает в «Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского» на должности ассистента кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи радиофизического факультета по совместительству.

Диссертация выполнена на кафедре статистической радиофизики и мобильных систем связи радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор Флакسمан

Александр Григорьевич работает профессором на кафедре статистической радиофизики и мобильных систем связи радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Официальные оппоненты:

1. Литвинов Олег Станиславович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.03 – Радиофизика), старший научный сотрудник, профессор кафедры ФН-4 «Физика» факультета фундаментальных наук, профессор кафедры РЛ1 «Радиоэлектронные системы и устройства» факультета радиоэлектроники и лазерной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
2. Иваненков Алексей Сергеевич, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.03 – Радиофизика), научный сотрудник лаборатории обработки многомерных сигналов отдела физической акустики федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской Академии наук»

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»), г. Нижний Новгород, в своем положительном отзыве, утверждённом 04.08.2022 г., подписанном доктором технических наук профессором А.В. Кашиным, научным руководителем филиала – заместителем главного конструктора филиала – начальником научно-исследовательского отделения филиала, указала, что диссертация Шмнина Олега Андреевича удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Шмонин Олег Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 — Радиофизика.

Соискатель имеет 30 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 14 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в WoS, Scopus и RSCI, опубликовано 5 работ.

Основные результаты диссертации были представлены на международных и всероссийских конференциях. Личный вклад соискателя в опубликованные в соавторстве работы заключается в

разработке двумерных псевдоспектрального и корневого вариантов метода минимального многочлена корреляционной матрицы сигналов в элементах антенной решётки; получении аналитического решения для базовой части метода минимального многочлена при числе источников излучения меньшем 4; обобщении метода минимального многочлена на случай пространственно-распределённой помехи (на основе обобщённой проблемы собственных чисел и обеляющего преобразования); формулировке критериев применимости концепции виртуальной антенной решётки в автомобильном ММО радаре при наличии отражений от земной поверхности и теоретическом исследовании их выполнения для различных конфигураций антенных решёток; в получении результатов численного моделирования для двумерного метода минимального многочлена и обобщённого метода минимального многочлена при наличии пространственно-распределённой помехи. Автор принимал участие в обработке экспериментальных результатов на автомобильном радиолокаторе миллиметрового диапазона.

Проверка текста диссертации не выявила неправомерных заимствований. Исследования являются оригинальными и представляются к защите впервые. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Ермолаев, В.Т. Угловое разрешение близкорасположенных источников сигналов с использованием двумерной антенной решетки и метода минимального многочлена / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, **О.А. Шмонин** // Изв. вузов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64. № 3. – С. 237-251.
2. Ермолаев, В.Т. Применение концепции виртуальной антенной решётки в ММО-радаре при наличии отражений от земной поверхности / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, **О.А. Шмонин** // Изв. вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. № 3. – С. 240-249.
3. Ермолаев, В.Т. Экспериментальное исследование углового сверхразрешения двух коррелированных сигналов методом минимального многочлена / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, А.В. Елохин, **О.А. Шмонин** // Изв. вузов. Радиофизика. – 2018. – Т.61. № 11. – С. 945-957.
4. Ермолаев, В.Т. Угловое сверхразрешение сигналов в антенной решётке с помощью корневого метода минимального многочлена корреляционной матрицы / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, А.В. Елохин, **О.А. Шмонин** // Изв. вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61. № 3. – С. 261-272.
5. Шмонин, О.А. Обобщение сверхразрешающего метода минимального многочлена для пеленгации целей в условиях пространственно-окрашенного шума и помех / **О.А. Шмонин** // Журнал радиоэлектроники. – 2021. - № 1. – С. 1 – 23.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов от:

1. Веремьёва Владимира Ивановича, кандидата технических наук по специальности 05.12.14 - Радиолокация и радионавигация, директора научно-исследовательского института систем прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций (НИИ «Прогноз») СПбГЭТУ "ЛЭТИ".
2. Маврычева Евгения Александровича, кандидата технических наук по специальности 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства радионавигации, радиолокации и телевидения, доцента, заместителя директора по науке научно-производственного центра - публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение "Алмаз" им. академика А.А. Расплетина».
3. Малеханова Александра Игоревича, кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - Радиофизика, заведующего отделом геофизической акустики Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук" (ИПФ РАН).
4. Морозова Олега Александровича, доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - Радиофизика, профессора, профессора кафедры информационных технологий в физических исследованиях физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского".
5. Мякинкова Александра Валерьевича, доктора технических наук по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация, доцента, директора института радиоэлектроники и информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Все отзывы **положительные**. В отзывах отмечается актуальность темы исследования, новизна полученных результатов и их значимость для науки и практики.

В отзывах на диссертацию и автореферат содержатся следующие замечания.

Замечания из отзыва ведущей организации.

При анализе разрешающей способности разработанных методов решающую роль играет отношение сигнал/шум-помеха (ОСШП). В связи с этим, результаты моделирования на рисунках 2.3 и 2.6 было бы физически нагляднее привести в зависимости от величины ОСШП, а не мощности полезных источников излучения.

При физической интерпретации результатов анализа выполнения критериев виртуальной антенной решётки для различных конфигураций антенной системы ММО радара, полученных в разделе 3.2, не хватает иллюстративного материала.

При описании условий натурного эксперимента в разделе 3.5 не приведены некоторые характеристики используемого автомобильного радара, в частности параметры зондирующего ЛЧМ сигнала.

В работе не приводятся оценки ресурсов аппаратной платформы при реализации на ней разработанных методов.

Несмотря на то, что комментарии к рисункам даны в тексте работы, на некоторых из них, например 1.3, 1.4 и 1.7, отсутствуют подписи к осям. На рисунке 1.11 для подписи горизонтальной оси используется обозначение M , хотя по смыслу поясняющего текста подразумевается N_h .

Замечания из отзыва официального оппонента Литвинова О.С.

В пеленгационных функциях (1.3.2), (1.3.5), (1.4.1) и (1.4.6), используется выражение вида $s^H(\varphi)\hat{\mathbf{P}}^H\hat{\mathbf{P}}\mathbf{s}(\varphi)$, где $\hat{\mathbf{P}}$ оценка проектора на шумовое подпространство. В тоже время, для точной матрицы проектора справедливо выражение $\mathbf{P}^H\mathbf{P} = \mathbf{P}$. Таким образом, следует дополнительно обосновать необходимость произведения $\hat{\mathbf{P}}^H\hat{\mathbf{P}}$ в указанных выражениях.

В разделе 2.4 приведены результаты численного моделирования, показывающие эффективность предложенного обобщения метода минимального многочлена для источников помехи с гауссовым распределением угловой плотности мощности. Вызывает интерес исследование эффективности предложенного подхода при других пространственных распределениях, например, распределении Лапласа.

В третьей главе вводятся два критерия применимости концепции виртуальной антенной решётки. Критерий равенства сигналов имеет явный физический смысл, в тоже время критерий равенства фазирующих векторов нуждается в более подробном изложении.

В разделе 3.4.1 значительное внимание уделяется технике пространственного сглаживания для линейной антенной решётки. Для двухмерной решётки лишь кратко указывается возможность и способ обобщения. Данный вопрос следовало изложить более детально с добавлением поясняющих иллюстраций.

Замечания из отзыва официального оппонента Иваненкова А.С.

В первой и третьей главах диссертации для определения размерности сигнального подпространства в методах MUSIC и root-MUSIC автор использует известный информационный критерий MDL. Данный метод в антенных решетках впервые был применён в 1985 г (Wax, M., and

T. Kailath. "Detection of Signals by Information Theoretic Criteria." IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1985). За это время наверняка были разработаны его модификации, а также другие методы (см, например, «Fishler, Eran, and H. Vincent Poor. "Estimation of the Number of Sources in Unbalanced Arrays via Information Theoretic Criteria." IEEE Transactions on Signal Processing 53, no. 9, 2005», «Fishler, E., M. Grossmann, and H. Messer. "Detection of Signals by Information Theoretic Criteria: General Asymptotic Performance Analysis." IEEE Transactions on Signal Processing 50, no. 5, 2002»). К сожалению, в диссертации нет объяснения, почему используется именно критерий MDL и не приводятся ссылки на другие работы.

На рис. 1.12 приведён график вероятностей правильной оценки числа источников в зависимости от мощности источников излучения (стр. 65). Из текста следует, что «оценка числа источников для метода минимального многочлена проводилась с помощью предложенного ранее алгоритма, описанного в разделе 1.2». Реализация данного алгоритма зависит от задаваемых пользователем параметров, таких как параметр « k », регулирующий вероятность ложной тревоги, от априорной информации о наличии интенсивных источников и др. Какие параметры алгоритма были заданы при оценке числа источников в конкретном случае, в диссертации не указывается.

Приводимые в первой и второй главах предложенные методы сверхразрешения на данных численного моделирования демонстрируют высокую эффективность. При этом моделирование производилось для идеальных условий, когда были точно известны координаты источников, мощность собственного шума была одинакова во всех каналах и т.д. Возникает вопрос, будут ли данные методы робастными по отношению даже к небольшому нарушению используемой модели на практике?

Отсутствие информации о графиках в подписях на определённых рисунках затрудняет восприятие результатов (см., например, рис. 1.12–1.17, 2.3, 2.5, 3.5, 3.6).

Замечание из отзыва на автореферат Веремьёва В.И.

К недостаткам автореферата следует отнести тот факт, что из текста не ясно как именно метрика (2) используется для оценки числа источников излучения.

Замечание из отзыва на автореферат Маврычева Е.А.

В качестве недостатка следует отметить, что при описании раздела 3.2 отсутствуют пояснения к величинам Γ_{tx} и Γ_{rx} , а также в тексте не расшифрована аббревиатура MIMO.

Замечания из отзыва на автореферат Малеханова А.И.

В выражениях (8) и (9) фигурирует корреляционная матрица (КМ) сигнала и КМ смеси шума и помехи, однако не указывается способ, которым они могут быть корректно и по отдельности

оценены в реальной системе. Известно, однако, что вопрос такой оценки является практически важным, особенно для систем, быстродействие которых является критическим параметром эффективности (во введении на это обращено внимание).

Результаты 6, 7 из перечня основных результатов диссертации сформулированы не достаточно убедительно. Сообщение о том, что «рассмотрены особенности применения...» (п. 6), не есть результат по своей сути, поскольку здесь не указано, какие именно особенности выявлены и насколько они существенны для применения предложенного метода. Аналогично, фраза «представлены экспериментальные результаты» (п. 7) тоже не содержит результата в явном виде, к тому же здесь не указано, в чем именно заключается подтверждённая «эффективность метода» и какими величинами она характеризуется в работе.

Замечания из отзыва на автореферат Морозова О.А.

При обсуждении оценки параметров минимального многочлена корреляционной матрицы автор утверждает, что значения функционала (2) сравниваются с неким «статистически обоснованным порогом», но не приводит ни формул, ни информации о том, как обосновывался выбор данного порога.

На рис. 3 не приводятся доверительные интервалы погрешности моделирования вероятностных характеристик. Не пояснено значение индекса n в подписи к горизонтальной оси на рис. 4.

Замечания из отзыва на автореферат Мякинкова А.В.

Недостаточно пояснён рис. 2. В частности, не приводятся значения различных цветов точек. Кроме того, указывается, что некоторые корни полиномов в случае точного проектора $\mathbf{P}$ должны лежать в комплексной плоскости на единичной окружности, а на рис. 2 таких точек нет.

В автореферате приводятся результаты сравнения предложенного метода с методами MUSIC и RootMUSIC. Безусловно, данные сверхразрешающие методы являются одними из наиболее известных и эффективных. Однако в тексте следовало явно пояснить мотивацию выбора данных методов в качестве опорных для сравнения.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается значительным опытом выполнения ими научно-исследовательских работ по тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований установлено следующее.

Разработанный двумерный корневой метод минимального многочлена позволяет эффективно выполнять оценку числа и угловых координат (азимута и угла места) близкорасположенных

источников излучения.

Выполненное обобщение метода минимального многочлена на случай пеленгации источников сигнала на фоне пространственно-распределённой помехи существенно улучшает качество сверхразрешения и оценки угловых координат.

Предложенные критерии виртуальной АР позволяют формализовать задачу применимости данной концепции в условиях наличия отражений от земной поверхности. Результаты анализа предложенных критериев для различных конфигураций реальных антенных решёток ММО (Multiple-Input Multiple-Output, с множеством приёмных и передающих элементов) радара показывают, что для правильной оценки угловых координат целей необходимо, чтобы либо приёмные, либо передающие элементы реальной антенной решётки имели одинаковую высоту.

Результаты натурного эксперимента подтверждают, что метод минимального многочлена позволяет эффективно разрешать близкорасположенные цели в автомобильном ММО радаре при наличии отражений от земной поверхности.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в диссертации впервые предложены и обоснованы двумерные корневой и псевдоспектральный методы оценки направлений прихода плоских волновых фронтов в прямоугольной антенной решётке на основе свойств минимального многочлена корреляционной матрицы, в том числе упрощённый корневой подход для двухстрочной (двухстолбцовой) антенной решётки. Проведено обобщение метода минимального многочлена на случай пеленгации источников сигнала на фоне пространственно-распределённой помехи. На основе введённых формальных критериев и модели сигнала изучена возможность применения концепции виртуальной антенной решётки в автомобильном ММО радаре при наличии отражений от земной поверхности. Доказано, что для выполнения введённых критериев необходимо, чтобы все передающие либо приёмные антенные элементы имели одинаковую высоту.

Значение полученных соискателем результатов для практики подтверждается тем, что созданные и представленные в диссертации высокоэффективные двумерные методы разрешения близкорасположенных источников сигналов в антенной решётке, а также результаты анализа радиолокационной ММО системы, могут быть использованы при совершенствовании современных и проектировании перспективных систем радиолокации, радиосвязи и гидроакустики различного назначения.

Оценка достоверности полученных результатов исследования выявила, что изложенные в диссертационной работе результаты подтверждаются их согласием с результатами исследований других авторов в данной области, полученными для частных случаев, а также согласием выводов

диссертации с данными численного моделирования и натурных экспериментов.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке задач, а также построении аналитических моделей, проведении теоретических и численных расчетов, обработке экспериментальных данных, обсуждении и физической интерпретации полученных результатов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- 1) Когда рассматривается вопрос отражения от земной поверхности, непонятно, какую роль играет неоднородность этой поверхности?
- 2) Непонятно, откуда берётся двукратно отраженный луч, он не изображён на рисунке.
- 3) Что изображено на графике на 28 слайде? Для этого графика земная поверхность считалась гладкой?
- 4) В начале доклада рассматривались две угловые координаты – угол места и азимут. В экспериментальных результатах приведены данные только по азимутальному углу. В эксперименте проводилось измерение только одной угловой координаты?
- 5) Что такое пространственно-распределённая помеха физически? Что это за факторы в реальной обстановке?
- 6) Вопрос касается приложений представленной работы на будущее. Можно ли её результаты применить, если мы учтём наличие бордюров, отбойников, тоннелей, где также возникают отражения?
- 7) На 28 слайде приводится сравнение метода минимального многочлена с методом Фурье. Это кажется не совсем корректным, поскольку метод минимального многочлена – это в какой-то мере вариант метода Писаренко. Его следовало бы сравнивать с другими сверхразрешающими методами, например, методом Кейпона. Не проводилось ли сравнение с чем-то другим?
- 8) Какой смысл вкладывается в термин сверхразрешение?
- 9) В первой главе везде полагается, что волна плоская. А если она немного не плоская, это не испортит результат? Это не исследовалось?
- 10) В третьей главе вводятся критерии применимости виртуальной антенной решётки ММО радара в условиях отражений? До Вас этим кто-то занимался, возможно, какие-то проблемы у них были, может они каким-то другим путём шли?

Соискатель Шмонин О.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

- 1) Применение концепции виртуальной антенной решётки исследовалось теоретически, поэтому была введена идеализированная модель, в которой земная поверхность

представлялась гладкой. Соответственно, в остальных случаях (при наличии неровностей) теоретический анализ осложняется, но полученные результаты можно рассматривать как качественные. Все полученные рекомендации к конфигурации ММО сохраняются.

- 2) Для этого луча сигнал был излучен в направлении земли, отразился от неё и цели, а затем по тому же пути вернулся назад в приёмник.
- 3) Это график зависимости отношения сигнал/шум от расстояния между радаром и целью. Влияние земной поверхности проявлялось в наличии провалов в отношении сигнал/шум, связанных с интерференцией прямого и отраженного от земли лучей. График получен на основе экспериментальных данных, поверхность – реальный асфальт.
- 4) Да, в эксперименте проводилось измерение только одной угловой координаты, поскольку использованная конфигурация ММО при наличии отражений от земной поверхности не позволяет измерять азимут и угол места одновременно, т.к. есть всего две степени свободы по вертикали.
- 5) Сигнал от других автомобильных радаров может рассеиваться от окружающих объектов: машин, знаков, столбов и т.д. Рассеянная помеха поступает на вход нашего радара, и мы должны её учесть.
- 6) Да, можно. Касательно теоретического анализа, можно рассматривать отражения не от горизонтальной поверхности, а от вертикальной. Мы также обрабатывали экспериментальные данные из реальных тоннелей, где видно отражённую от стен цель. Однако эти результаты не вошли в диссертацию.
- 7) Рисунки на 28 слайде носят больше иллюстративный характер, и метод Фурье здесь выбран как самый простой и типичный алгоритм, применяемый в радарх. Для статических сценариев метод сравнивался с другим сверхразрешающим методом, а именно Root MUSIC.
- 8) Сверхразрешение - это разрешение целей, угловое расстояние между которыми меньше ширины главного лепестка диаграммы направленности антенной решётки.
- 9) Нет, поскольку в приложениях, для которых в первую очередь разрабатывались данные методы (а это радиолокация), плоский волновой фронт является типичной постановкой задачи.
- 10) При проведении данного исследования был выполнен обзор имеющейся литературы. Применительно к двумерным случаям вопрос влияния отражений от земной поверхности на формирование двумерной виртуальной антенной решётки не рассматривался.

На заседании 28.09.2022 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития радиофизики, присудить Шмонину О.А. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени — 16, против присуждения ученой степени — нет, недействительных бюллетеней — нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета



Бакунов Михаил Иванович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Клюев Алексей Викторович

28.09.2022