

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**на диссертационную работу Шмонина Олега Андреевича**  
**«Разработка методов двумерного углового разрешения источников излучения**  
**в адаптивных антенных системах», представленную на соискание ученой**  
**степени кандидата физико-математических наук по специальности**  
**1.3.4 – Радиофизика**

Диссертация Шмонина О.А. посвящена разработке сверхразрешающих методов двумерного углового разрешения источников сигнала с помощью прямоугольной антенной решётки, а также аспектам, связанным с применением данных методов в радиолокационных системах, использующих технологию MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).

В настоящее время адаптивные антенные решётки находят применение в различных практических приложениях, в том числе в радиолокации и радиосвязи. Такие антенные системы предоставляют широкий спектр возможностей для эффективной оценки параметров принимаемых сигналов, оптимального приёма и передачи в условиях изменяющейся сигнально-помеховой обстановки.

Одной из главных проблем развития современных методов обработки сигналов в антенных решётках является оценка числа и угловых координат близких источников излучения, неразрешимых по критерию Релея (т.е. угловое расстояние между которыми меньше ширины главного лепестка диаграммы направленности). Высокие требования к точности оцениваемых параметров, предъявляемые в современных радиотехнических системах, ведут к необходимости синтеза новых «сверхразрешающих» методов и совершенствования существующих. В настоящее время усилия многих исследователей направлены на разработку новых методов пространственной обработки сигналов в антенных решётках, что подтверждается большим объёмом публикаций по данной проблеме. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

В **первой** главе диссертации рассматривается проблема двумерной пеленгации источников излучения с помощью прямоугольной антенной решётки на фоне собственных шумов приёмников. В качестве основы для синтеза новых двумерных сверхразрешающих алгоритмов выбран метод минимального многочлена корреляционной матрицы, ранее предложенный для линейной антенной решётки. Данный выбор обосновывается высокой эффективностью данного метода по сравнению с другими алгоритмами, особенно в практически важных случаях короткой выборки сигнала и коррелированных источников излучения.

В диссертации предлагается модификация базовой части метода минимального многочлена, направленная на уменьшение вычислительной сложности. В частности, приводится вариант замены итеративного численного решения системы нелинейных уравнений на аналитические выражения при малом (менее четырёх) числе источников излучения.

Для непосредственной оценки угловых координат источников рассматриваются два подхода: псевдоспектральный и корневой, реализация которых существенно отличается от случая линейной антенной решётки. В псевдоспектральном подходе координаты источников оцениваются посредством поиска пиков разрешающей функции (псевдоспектра). В корневом подходе – посредством поиска корней полиномов, полученных на основе данной функции. В частном случае двухстрочной антенной решётки также дополнительно предлагается новый упрощённый корневой подход. С помощью численного моделирования показывается высокая эффективность синтезированных методов по сравнению с алгоритмами MUSIC и Root MUSIC. Отмечается превосходство корневого подхода над псевдоспектральным по разрешающей способности и точности оценки угловых координат.

**Вторая глава** диссертации посвящена обобщению метода минимального многочлена на случай пеленгации источников сигнала при наличии пространственно-распределённой помехи. Рассматриваются три варианта: на основе обобщённой проблемы собственных чисел для пучка корреляционных матриц, обеляющих преобразований с применением разложения Холецкого и инверсного матричного корня. Показывается строгая математическая эквивалентность данных подходов. Эффективность предложенного метода по сравнению с классическим вариантом метода минимального многочлена исследуется с помощью численного моделирования. Отмечается повышение разрешающей способности и уменьшение систематической ошибки пеленгации, вызванной помехой.

**В третьей главе** рассматривается задача оценки угловых координат целей в автомобильном MIMO радаре в условиях наличия отражений от земной поверхности. Описывается концепция формирования виртуальной антенной решётки MIMO радара и вводятся два формальных критерия её применимости. Критерий равенства сигналов требует совпадения сигналов эквивалентных виртуальной и реальной антенных решёток. Критерий равенства фазирующих векторов – представления сигнала виртуальной антенной решётки в виде суперпозиции тех же волновых фронтов, что и сигнала эквивалентной реальной антенной решётки. Вводится четырёхлучевая модель сигнала при наличии отражений от земной поверхности и на её основе проводится теоретический анализ введённых критериев для различных конфигураций антенной системы MIMO радара. С помощью численного моделирования показывается существенное снижение точности оценки угловых координат при нарушении критериев применимости виртуальной антенной решётки. Рассматриваются особенности применения разработанных методов сверхразрешения в автомобильном MIMO радаре. Приводятся результаты натурного эксперимента, демонстрирующие эффективность метода минимального многочлена, применяемого в виртуальной антенной решётке MIMO радара при наличии отражений от земной поверхности и выполнении введённых критериев.

Полученные в диссертационной работе результаты основаны на научно обоснованных предположениях и моделях. Предлагаемые решения имеют чёткое теоретическое обоснование, базирующееся на положениях статистической радиофизики, линейной алгебры и теории матриц. Результаты численного моделирования и натурных экспериментов, подтверждают достоверность и обоснованность всех основных результатов, выводов и рекомендаций.

Диссертация обладает высокой степенью научной новизны. Основные результаты заключаются в следующем:

1. Разработан двумерный корневой метод минимального многочлена, позволяющий эффективно оценивать число, азимут и угол места близкорасположенных источников излучения;
- 2 . Выполнено обобщение метода минимального многочлена на случай пеленгации источников сигнала на фоне пространственно-окрашенной помехи, существенно улучшающее качество разрешения и оценки угловых координат по сравнению с классическим методом;
3. Предложены формальные критерии применимости виртуальной антенной решётки MIMO радара и приведены результаты их анализа для различных конфигураций антенных систем при наличии отражений от земной поверхности; показано, что все приёмные или передающие антенные элементы должны иметь одинаковую высоту;
4. Результаты натурного эксперимента подтверждают, что метод минимального многочлена позволяет эффективно разрешать по углу близкие цели с помощью виртуальной антенной решётки MIMO радара при наличии отражений от земной поверхности и выполнении введённых критериев.

Результаты диссертации оформлены в виде структурированного и хорошо проработанного текста. Несомненными достоинствами диссертации являются подробное теоретическое обоснование и анализ разрабатываемых методов в сочетании с показательными результатами численного моделирования и натурного эксперимента.

Вместе с тем, имеется ряд замечаний и недостатков:

1. В пеленгационных функциях (1.3.2), (1.3.5), (1.4.1) и (1.4.6) используется выражение вида  $s^H(\varphi)\widehat{\mathbf{P}}^H\widehat{\mathbf{P}}s(\varphi)$ , где  $\widehat{\mathbf{P}}$  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  $\widehat{\mathbf{P}}^H\widehat{\mathbf{P}}$  в указанных выражениях.
2. 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.

3. 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 из

4. 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.

Указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа Шмонина О.А. на тему «Разработка методов двумерного углового разрешения источников излучения в адаптивных антенных системах» представляет собой сформированную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития радиофизики в области анализа и статистической обработки сигналов в адаптивных антенных решетках. Представленные автором в диссертационной работе результаты являются новыми, обоснованными и достоверными, имеют практическую и теоретическую значимость.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Среди них 4 статьи в журналах, включенных в библиографические базы данных Web of Science и Scopus, 1 статья, включенная в базу данных RSCI (Russian Science Citation Index). Также, результаты диссертационной работы докладывались на международных и российских конференциях. Автореферат правильно раскрывает содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным действующим «Положением о присуждении учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Соискатель Шмонин Олег Андреевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - радиофизика.

### **Официальный оппонент,**

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)», старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук (по специальности 01.04.03 – Радиофизика)

Литвинов Олег Станиславович

/ Литвинов О.С. /

105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, к. 1  
тел. +7 (903) 674-54-24  
e-mail: oleglitv@bmstu.ru

Подпись О.С. Литвинова заверяю

Заместитель начальника управления кадров Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»



/ Матвеев А.Г. /