

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
на диссертацию Семенова Виталия Юрьевича  
«Методы пространственно-временной цифровой обработки сигналов  
в локационных системах для адаптивного подавления помех,  
обнаружения и пеленгации целей»,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика

**Актуальность темы диссертации**

Цифровые антенные решетки – актуальнейшее направление в современной радиолокации и радиосвязи, в том числе широкополосной. Связано это с тем, что большими темпами возрастают требования к разрабатываемым радиолокационным и радиосвязным комплексам. Практическое применение многоканальных адаптивных систем неизбежно сопровождается двумя проблемами. Первая из них связана с изменением во времени сигнально-помеховой обстановки, статистика которой, как правильно, заранее не известна. Вторая проблема – это уменьшение вычислительной сложности методов помехоподавления, обнаружения целей и их пеленгации.

Одним из подклассов локационных систем являются радиотелеметрические комплексы с автоматическим сопровождением целей и одновременным приемом от них телеметрической информации. Именно в таких комплексах специальные бортовые вычислители требуют новых методов обработки сигналов в условиях воздействия помех с уменьшенной вычислительной сложностью и с возможностью реализации этих алгоритмов в доступных математических библиотеках сигнальных процессоров.

Результаты исследований автора диссертации позволяют оптимизировать работу адаптивных антенных решеток по критерию «вычислительная сложность – помехозащищенность». Они дают возможность выбрать оптимальным образом комбинацию между временем отклика алгоритма, уровнем подавления помехи и точностью пеленгации цели. Представленные в диссертации научные результаты являются решением указанных выше проблем в области теории многоканальных адаптивных цифровых антенных решеток.

До исследований автора чаще всего указанные проблемы рассматривались по отдельности либо в условиях заранее известной статистики части параметров сигнально-помеховой обстановки. В диссертации предлагается

единая методика цифровой обработки сигналов в локационных комплексах на базе цифровых антенных решеток. По совокупности указанных выше причин, тема диссертации, несомненно, актуальна.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научные положения и выводы в диссертации обоснованы, с одной стороны основательной апробацией в различных журналах, в том числе индексируемых WoS и Scopus, и с другой стороны – наличием свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Достоверность научных выводов в диссертации обеспечивается обоснованными допущениями и корректным выбором ограничений, согласованностью аналитических результатов с результатами натурных экспериментов и численного моделирования с использованием большого статистического ансамбля.

### **Новизна положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Полученные автором результаты анализа характеристик адаптивных антенных решеток, таких, как выходное отношение сигнал-шум, вероятность разрешения двух целей, оценка эффективного числа источников в эфире, а также положения, выводы и рекомендации составляют несомненную научную новизну диссертации.

В первой главе разработан метод аналитической регуляризации корреляционной матрицы входного процесса многолучевой двумерной антенной решетки для подавления узкополосных помех за малые интервалы времени. Полученные результаты основаны на теории линейной алгебры. Рассчитаны такие характеристики антенной решетки, как потери в выходном отношении сигнал-шум, диаграмма направленности, эффективное число помех в эфире и все это в условиях короткой выборки входного процесса. В работе отмечается, что предложенный метод автоматической регуляризации корреляционной матрицы проверен на наборе натурных экспериментов как в азимутальной, так и в угломестной плоскостях и для разных типов модуляции помех.

Вторая глава посвящена развитию методов широкополосного помехоподавления в рамках единого подхода об использовании короткой выборки входного процесса для уменьшения вычислительной сложности и времени отклика антенны на изменение помеховой обстановки. Алгоритм, применяющий многоотводную линию задержки, является классическим. Однако предложенная методика выбора длины линии задержки для многоканального автокомпенсатора и адаптивной решетки является несомненным достоинством работы. В диссертации показано, что развитая теория хорошо применима как к активным радиолокационным системам, так и к радиотелеметрическим комплексам. В этом ее дополнительная польза и новизна.

В третьей главе предлагается метод двумерной пеленгации, обладающий свойством сверхразрешения двух целей в пассивной радиотехнической системе, работающей в сложной помеховой обстановке. Носителем антенной решетки является радиотелеметрический комплекс с автоматическим сопровождением целей. В данной главе сочетаются и научная новизна материала, и высокая практическая значимость, обусловленная тем, что предложенный метод определяет пеленги источников телеметрической информации в условиях воздействия помех за малые интервалы времени. При этом заявленные свойства метода пеленгации, в том числе свойство сверхразрешения двух источников информации, подтверждены широким набором экспериментов.

В четвертой главе предложены новые методы для двумерной пеленгации, но уже для активных локационных модулей на основе технологии ММО с формированием виртуальных каналов. Основная новизна в данной главе диссертации состоит в возможности за счет предложенного алгоритма индивидуального кодирования зондирующих сигналов увеличения апертуры антенной решетки без увеличения габаритных размеров модуля. Это без преувеличения активно развивающаяся научная область не только в нашей стране, но и за рубежом. Полученные результаты имеют высокую научную ценность и перспективы развития, поскольку в настоящее время беспилотный транспорт находит все большее применение в отечественной промышленности.

В пятой главе описываются предлагаемая структура автомобильного радара и конвейер обработки сигналов для совместного обнаружения целей, находящихся на разных дальностях, азимутах и движущихся с разными ско-

ростями в условиях воздействия помех разного типа. Данная проблема не только актуальна, но крайне приближена к практике. Научной изюминкой главы является предложенный метод максимально-правдоподобной оценки радиолокационного канала в условиях воздействия помех. Результаты, полученные в пятой главе, могут быть использованы для решения задач, заявленных в национальной технологической инициативе по направлению «Авто-нет» в разделе системы помощи водителю.

Приведенные в диссертационной работе формулировки выводов, положений и рекомендации отражают их научную новизну.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость диссертации заключается в детальном аналитическом исследовании процедур регуляризации помеховых и сигнальных корреляционных матриц случайных процессов, принимаемых антенными решетками. Основным теоретическим результатом стали полученные формулы, которые позволяют регуляризовать матрицу, оцененную с помощью малого числа выборок, не используя априорных данных, с последующей возможностью ее обращения или сингулярного разложения.

Практическая значимость диссертационной работы определяется возможностью прямого применения разработанных методов пеленгации полезных источников при наличии и отсутствии помех при проектировании устройств цифровой обработки сигналов в различных радиосистемах. Результаты диссертации будут особенно полезны для использования в современных и перспективных радиотелеметрических комплексах с автоматическим сопровождением целей. Основная практическая ценность здесь – это улучшение качества траекторных измерений в виде уменьшения ошибки пеленгации сопровождаемого объекта и уменьшения вероятности битовой ошибки при приеме телеметрической информации от него.

### **Замечания по диссертации**

1. В первой главе при обработке натурального эксперимента с использованием радиолокационной станции дециметрового диапазона подтверждена возможность оценки эффективного числа тональных помех. В то же время,

когда узкополосная помеха является еще и фазомодулированной, предложенный метод не позволяет оценить истинное число помех в эфире. В диссертации подробно не объяснена причина этого эффекта.

2. Во второй главе на рисунке 2.4 показан коэффициент корреляции широкополосной помехи. При этом к нему не дано подробных пояснений. В частности, не указано, что имеется в виду под числом отводов  $T$  в линии задержки применительно к этому графику.

3. Двумерная пеленгация, о которой идет речь в третьей главе, реализуется во многих двумерных активных фазированных антенных решетках. Не указано, в каких случаях возникает необходимость «сверхразрешения коррелированных целей для автоматического сопровождения в условиях воздействия узкополосных помех».

4. В диссертации в разделе 4.1 не представлен расчет, на сколько ограничивается возможность однозначного измерения скорости в автомобильном ММО-радаре, если использовать предложенный метод формирования виртуальных приемных каналов, за счет кодирования зондирующего сигнала.

5. Для уменьшения уровня боковых лепестков быстрого преобразования Фурье в частотной области используется процедура наложения весового окна. В диссертации, на мой взгляд, не хватает простого объяснения причин необходимости разрабатывать метод обнаружения одновременно ближних и дальних целей в автомобильном радаре в главе 5.

### **Заключение**

Указанные замечания не снижают ценности работы и не ставят под сомнение ее положительную оценку.

Автореферат верно отражает содержание диссертационной работы. В нем изложены основные результаты диссертации, степень научной новизны и практическая ценность работы.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Результаты работы представляют научную и практическую ценность. Автором решена актуальная проблема современной радиофизики.

Работа удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор, Семенов Виталий Юрьевич, достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент:

**Рабин Алексей Владимирович**

Доктор технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, доцент,  
проректор по научной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича».

+7 (812) 326-31-63, доб. 1356

193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д.22, к.1

vicerector.sc@sut.ru



(подпись)



(расшифровка подписи)

11.03.2026

Подпись (-и) руки 

заверяю

Начальник управления персоналом

А. Д. Смородинцева

11.03.2026 г.

