

## ОТЗЫВ

Официального оппонента д.т.н., доцента

Степанова Максима Андреевича

на диссертацию Фёдорова Сергея Михайловича

**«Синтез многолучевых антенных систем с физическими и виртуальными элементами для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности

2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**Общая характеристика работы.** Представленная диссертация содержит 307 стр. текста с рисунками и таблицами, списком использованных источников из 345 наименований. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы.

Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно раскрывает ее содержание.

Работа направлена на решение актуальной научно-технической проблемы создания многолучевых антенных систем, позволяющих улучшить помехоустойчивость радиоэлектронной аппаратуры.

**Актуальность работы** связана с необходимостью минимизации существенного влияния сложной помеховой обстановки на качество и дальность связи в различных системах радиосвязи. При этом для антенных систем, размещаемых на подвижных объектах, решения, используемые для стационарных объектов, не могут быть непосредственно применены в силу тактических особенностей объектов, более жестких требований стойкости, существенных массогабаритных ограничений. Поэтому необходимы научно обоснованные методологические, технические и алгоритмические решения, учитывающие эти особенности и обеспечивающие создание антенных систем с возможностью управления диаграммой направленности, а также удержания в

высоконаправленном луче подвижного объекта. Таким образом, тема диссертации Фёдорова С.М. представляется в достаточной степени актуальной.

**Научная новизна результатов.** Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Разработан метод формирования виртуальной антенной решетки, величина радиуса которой адаптивно изменяется в зависимости рабочей частоты.

2. Разработан и исследован метод пеленгации, основанный на использовании магнитной компоненты поля, рассчитываемой на основе вектора электрической напряженности, измеренной с помощью разработанной векторной антенны.

3. Разработан и исследован управляемый метаматериал, позволяющий формировать отражающие поверхности произвольной формы, путем замыкания коммутационных элементов, располагаемых в точках пересечения тонких проволочек, образующих тело метаматериала.

4. Разработана и исследована диаграммообразующая схема на основе перфорированного листа, позволяющей решить проблему затенения каналов при реализации полноазимутального сканирования в многолучевых антеннах.

5. Разработана модель многолучевой антенны на основе линзы с уменьшенными вертикальными размерами с помощью применения аппарата трансформационной оптики.

6. Разработана модель поляризационно-селективного зеркала, позволяющая строить многолучевые антенны с полноазимутальным сканированием.

**Достоверность результатов и обоснованность выводов по диссертационной работе** обеспечиваются корректным использованием методов анализа и синтеза антенн, вычислительных методов электродинамики, методов математического моделирования, применением современных САПР для электродинамического моделирования.

## **Соответствие диссертации и автореферата установленным требованиям.**

Работа соответствует пунктам 2, 3 и 9 паспорта специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Диссертация по содержанию и оформлению удовлетворяет действующим требованиям Положения о присуждении ученых степеней. В диссертации имеются все необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя.

Автореферат соответствует основным положениям диссертации, правильно и достаточно полно передает ее содержание, позволяет ясно представить сформулированные в диссертации задачи исследования, основное содержание и идеи работы, а также выводы и рекомендации и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней.

## **Наиболее значимые теоретические и практические результаты диссертации.**

К наиболее значимым с теоретической точки зрения результатам можно отнести:

- разработан и исследован метод формирования виртуальной антенной решетки, отличающийся адаптивным выбором радиуса решетки для определенной частоты;

- разработан и исследован управляемый метаматериал в виде электромагнитного кристалла, на основе которого может быть построен ряд антенных устройств, таких как фазовращатели, отражательные фазированные антенные решетки, реконфигурируемые рефлекторные антенны.

К значимым с практической точки зрения результатам относятся:

- разработана диаграммообразующая схема в виде двухуровневой линзы, которая может быть использована для построения многолучевых антенн с полным сектором сканирования в азимутальной плоскости без эффекта затенения каналов;

- разработано поляризационно-селективное зеркало, на основе которого могут быть построены многолучевые антенны;

### **Теоретическая значимость.**

Диссертация посвящена решению важной научной проблемы развития и исследования методов улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры, основанных на аппроксимации значений поля до их искажения на рассеивателях, использовании рассчитанной магнитной компоненты поля при пеленгации, разработке методов построения полноазимутальных многолучевых антенн, а также разработке управляемого метаматериала для построения реконфигурируемых антенн.

Судя по автореферату, результаты, полученные в ходе выполнения диссертации, были использованы в следующих научно-исследовательских работах:

– грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-57.2020.9 «Исследование и разработка опто-управляемого метаматериала для создания многофункциональных сверхширокополосных антенных систем»;

– грант Российского научного фонда № 19-79-10109 «Аппроксимация пространственного распределения электромагнитного поля в окрестности расположения трехмерных рассеивателей с априорно неизвестными геометрией и материальными свойствами с целью формирования дополнительных "виртуальных" каналов радиоприема»;

– продленный грант Российского научного фонда № 19-79-10109-П;

– государственное задание № FZGM-2024-0003 по созданию молодежной лаборатории «Помехоустойчивых систем связи и управления наземными и воздушными беспилотными роботизированными аппаратами»;

– государственное задание № FZGM-2023-0011 «Разработка и исследование аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего функциональность беспилотных летательных аппаратов малого радиуса действия»;

– государственное задание № FZGM-2024-0006 «Разработка и исследование принципов создания системы обнаружения беспилотных летательных аппаратов с использованием аэромобильных антенных систем».

### **Ценность диссертации для практики.**

Практическая значимость результатов диссертации заключается в создании антенных систем и математического обеспечения, позволяющих значительно повысить помехоустойчивость радиоэлектронного оборудования, что подтверждается внедрением результатов работы в АО НПП «Автоматизированные системы связи», АО НВП «ПРОТЕК», АО «НКТБ «Феррит», АО «Электросигнал», а также - в учебный процесс ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж).

**Апробация результатов, публикации.** Диссертационная работа прошла достаточную апробацию в процессе обсуждения ее основных результатов на различных научно-технических конференциях. Основные научные и прикладные **результаты опубликованы** в 46 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК; 19 статьях в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus; и в 37 публикациях в форме текстов и тезисов докладов на международных и российских конференциях.

### **Недостатки диссертационной работы.**

По диссертации имеется ряд вопросов и замечаний.

1. На стр. 59 сказано, что при в модели головы человека приняты значения относительной диэлектрической и магнитной проницаемостей равных единице. Чем тогда голова и рука отличается от окружающего пространства? Как она могла оказать влияние, рассмотренное в разделе 2.2? Известно, что диэлектрическая проницаемость для разных тканей человеческого организма различна и составляет несколько десятков.

2. Судя по рисункам 2.2 и 2.3, при радиусах 20, 40 и 60 мм ошибка пеленга почти не меняется и во всех трех случаях достигает величины 15 – 20 градусов. Увеличение апертуры приводит, фактически, лишь к изменению той

частоты, на которой ошибка максимальна. При радиусе равном 80 мм, происходит существенное снижение ошибки пеленга (максимальная ошибка составляет порядка 5 – 7 градусов) и изменяется характер частотной зависимости ошибки пеленга. Объяснению этому автор не приводит.

3. Параметры сигналов с виртуальных элементов антенной решетки линейно связаны с параметрами реальных – выходные сигналы виртуальных элементов вычисляются на основе выходных сигналов реальных. Это снизит пространственную избирательность антенной решетки. В тексте диссертации автор не приводит диаграмм направленности антенной решетки из реальных элементов и решетки, дополненной виртуальными. Кроме того, автор не приводит сведений о диапазоне области, в пределах которой можно размещать виртуальные элементы. Отсутствуют сведения о том, как влияет отношение сигнал шум на размер этой области.

4. Не понятно, почему точность расчета фазы виртуальных элементов столь низка (рисунок 2.7, элементы 5 – 7, 14). Фаза существенно отличается от истинной даже в том случае, если элемент присутствует.

5. В тексте диссертации сказано, что выражение (2.6) простое и очевидное. Вместе с тем не понятно, чем определяются числа 2.2 и 1.2 и как сформировалось само выражение.

6. Элемент векторной антенны – симметричный вибратор на частоту около 3 ГГц (длина 50 мм). Измерения проводятся в окрестности частоты 700 МГц. Автор не раскрывает эффективность вибратора в этом частотном диапазоне. Кроме того, при разработке векторных антенн не учитывается взаимное влияние ее элементов.

7. В разделе 4.1 размер ячейки рассчитывается на частоту 10 ГГц. В разделе 4.2 на частоту 6.88 ГГц, а на рисунке 4.6 значения относительной диэлектрической и магнитной проницаемости приведено для диапазона частот от 4.8 до 8 ГГц (при этом диапазон рабочих частот волновода, в котором устанавливался метаматериал, от 5.85 ГГц), а направленные свойства реконфигурируемого рефлектора оцениваются в диапазоне от 10 до 18 ГГц.

Автор никак не комментирует разнообразие частотных диапазонов и их несогласованность между собой.

8. Комментируя рисунок 4.8 автор утверждает, что «волна незначительно просачивается через электрически замкнутую плоскость...». Численной оценки нет, судя по цветовой гамме рисунка 4.8 «просачивание» может быть на уровне от минус 6 до минус 8 дБ от падающей волны, что довольно сложно охарактеризовать как «незначительно».

9. Чем определяется нижняя рабочая частота реконфигурируемого рефлектора? Какова требуемая и достижимая точность аппроксимации его формы с учетом управления коммутирующим устройством?

10. Нет численной оценки повышения помехоустойчивости РАЭ, достижимой с использованием предлагаемых автором диссертации решений.

11. В диссертации присутствует ряд опечаток. Например: стр. 42, 3 и 2 строки снизу; стр. 48, 3 строка сверху; на стр. 62 радиус антенной решетки 50 м; на стр. 114 и ряде других англоязычные надписи на рисунках; стр. 141 выражение «наиболее оптимальными...»; стр. 159, рис. 4.17 уровень коэффициента отражения более 0 дБ.

**Выводы.** На основании изложенного выше можно сделать следующее заключение. Диссертация соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней и является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение проблемы, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, а именно – создание антенных систем, обеспечивающих повышение помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры.

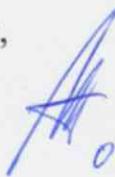
Основные результаты диссертации опубликованы в 46 статьях в рецензируемых научных изданиях; имеются все необходимые ссылки на заимствованные материалы и отдельные результаты, диссертация удовлетворяет требованиям п.п. 11, 13, 14 Положения.

Таким образом, диссертационная работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к

диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор, Фёдоров Сергей Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Согласен с включением моих персональных данных в аттестационное дело соискателя Фёдорова С.М. и их дальнейшей обработкой.

Доктор технических наук,  
доцент

  
04.09.2015

Степанов Максим Андреевич

Сведения об авторе отзыва: Степанов Максим Андреевич, заведующий кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, доктор технических наук, доцент.

Адрес организации: 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20

Телефон: 8-913-918-04-11

Эл.почта: m.stepanov@corp.nstu.ru

Подпись Ст  
нов ОМ ИСТМ  
  
заверено  
новалова ОМ