

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук, доцента Глыбовского Станислава Борисовича на диссертацию Генералова Алексея Анатольевича «Полупрозрачные вогнутые экраны антенн высокоточного спутникового позиционирования», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

### Актуальность темы диссертации

В задачах снижения ошибки многолучевости систем спутникового позиционирования, а также, в задачах электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, возникает необходимость получения диаграммы направленности с резким перепадом в пределах малого сектора углов. Разработка новых методов подобного управления диаграммой направленности является крайне востребованной т.к. позволит существенно улучшить точность позиционирования и снизить нежелательное взаимное влияние антенных систем. Диссертация посвящена задачам построения полупрозрачных экранов, дополняющих конструкцию антенны с целью формирования желаемой диаграммы направленности. Важным аспектом является также применение в работе метаповерхностей для построения полупрозрачных экранов. Метаповерхности являются электрически тонкими периодическими структурами, реализующими в определенном диапазоне частот заданный сеточный импеданс, и позволяют получить заданные коэффициенты отражения и прохождения электромагнитных волн. Данным структурам и их применениям в антенной технике посвящено значительное внимание в научно-технической литературе последних лет.

Таким образом, тема диссертационной работы Генералова Алексея Анатольевича является актуальной и соответствует специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

### Содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Во **введении** приведён подробный аналитический обзор работ по теме исследования, обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и задачи, приводятся положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна и практическая значимость работы, кратко изложено её содержание.

**Первая глава** посвящена синтезу плоских полупрозрачных экранов, обеспечивающих резкую отсечку поля заданного источника при пересечении границы зоны тени. Построена аналитическая процедура синтеза импеданса в приближении геометрической оптики (ГО), численно исследованы границы применимости этого приближения. За пределами границ применимости построена численная оптимизационная процедура синтеза с использованием методов восстановления поля по желаемой асимптотике в дальней зоне. Приведены оценки



реализуемой отсечки, показывающие значительное преимущество полупрозрачных экранов над идеально проводящими. Результаты численного синтеза подтверждены результатами строгого электродинамического моделирования.

Во **второй главе** для вогнутых полупрозрачных экранов, охватывающих источник излучения построена аналитическая процедура синтеза импеданса, исследованы границы применимости указанных приближений, а также построена численная оптимизационная процедура синтеза импеданса, обеспечивающего резкую отсечку поля источника при переходе в зону тени. Показаны особенности решения обратной задачи, позволившие получить физически реализуемые распределения импеданса. На примере модели антенной решетки продемонстрирована возможность формирования ДН с резкой отсечкой начиная от углов, близких к касательным к плоскости решетки и подавления задних лепестков решетки с помощью экрана, размер которого незначительно превосходит размер решетки.

В **третьей главе** представлены разработки полупрозрачных экранов антенн, позволяющие обеспечить желаемую форму ДН при использовании в малогабаритных интегрированных устройствах высокоточного спутникового позиционирования. Автором установлены характеристики полупрозрачного экрана, позволяющие снизить коэффициент усиления антенны в нерабочей области углов, а также вдвое уменьшить габарит антенной части навигационного приемника по высоте. Показана возможность создания экрана, обеспечивающего желаемый эффект одновременно в двух диапазонах частот. Экспериментальное исследование построенных антенных прототипов показало отсутствие вносимых экраном тепловых потерь.

В **заключении** сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований.

### **Научная новизна**

В ходе проведенных исследований автором получен ряд новых научных результатов:

1. Предложена аналитическая процедура синтеза импеданса экрана, формирующего желаемую ДН с отсечкой в приближении геометрической оптики. Изучены границы применимости этого приближения.
2. Предложен метод восстановления поля вблизи экрана по желаемой асимптотике поля в дальней зоне с целью уточнения пространственного распределения сеточного импеданса экрана по сравнению с приближением геометрической оптики при уменьшении расстояния до источника.
3. Получены оценки размеров экранов, обеспечивающих заданные величины отсечки ДН источника при переходе в зону тени. Построены процедуры, позволяющие синтезировать физически реализуемые распределения импеданса экрана.



4. Предложена компактная антенная система спутникового позиционирования с полупрозрачным экраном, служащим для уменьшения коэффициента усиления антенны в нерабочей области углов с целью уменьшения ошибки многолучевости.

### **Достоверность научных результатов**

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается отличным совпадением результатов решения задачи синтеза предложенного полупрозрачного экрана на основе численно-аналитической оптимизации и результатов строгого численного моделирования в программной среде CST, а также совпадением результатов численного моделирования и измерения характеристик экспериментального образца компактной антенной системы спутникового позиционирования в условиях безэховой камеры.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость состоит в создании прототипов компактных антенных систем с полупрозрачными экранами, формирующими требуемую ДН и позволяющими снизить ошибку многолучевости при использовании в малогабаритных устройствах высокоточного спутникового позиционирования. Предложенная конструкция позволяет вдвое уменьшить габарит антенной части высокоточного навигационного приемника по высоте по сравнению с существующими образцами, что позволяет создать низкопрофильные антенны с высокой точностью позиционирования.

### **Апробация и внедрение результатов**

Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены в трех статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, доложены и обсуждены на российских и международных конференциях, в том числе входящих в перечень Web of Science/Scopus. Результаты работы внедрены в НИОКР ООО «Топкон Позициониг Системс». Кроме того, был получен патент и подана заявка на патент.

### **Общая оценка диссертационной работы**

Данная работа представляет собой последовательное и хорошо структурированное научное исследование, направленное на оптимизацию антенной системы по критерию прецизионной настройки формы диаграммы направленности посредством использования полупрозрачных пространственно-неоднородных импедансных экранов. В работе описываются три различных подхода к решению задачи обеспечения диаграммы с резким спадом в узком диапазоне по углу места (диаграммы с отсечкой), базирующиеся на аналитических методах. Данные подходы к решению задачи синтеза (приближение геометрической оптики, восстановление поля по желаемой асимптотике в дальней зоне,



численная оптимизация с аналитическим начальным приближением) имеют различные продемонстрированные области применения с точки зрения требуемых габаритов экрана.

Основным достоинством работы является эффективность и сравнительная простота предложенных подходов к синтезу диаграммы направленности сложной формы, в основе каждого из которых лежит элегантная аналитическая модель. Так предложенные подходы на основе приближения геометрической оптики и восстановления поля по желаемой асимптотике в дальней зоне позволяют получить выражения для пространственного распределения импеданса полупрозрачного экрана в сравнительно простом аналитическом виде. Однако, полученные формулы имеют четкий физический смысл и в рамках заранее выбранной практической реализации полупрозрачного экрана в виде нагруженной на сосредоточенные элементы частотно-селективной метаповерхности, позволяют синтезировать экспериментальный образец экрана определенных размеров. Другими достоинствами работы являются подробное описание построения процедур оптимизации, четкое определение границ применимости каждого из подходов, отличное совпадение аналитических и численных результатов, а также численного моделирования и измерений на примере предложенной антенной системы. Также следует отметить высокий уровень научно-технического языка, качество изложения результатов и отличное оформление диссертационной работы.

Стоит отметить также несколько недостатков работы:

1) В разделе 1.6 при анализе влияния частотной зависимости импеданса экрана на достижимую полосу частот отсечки (данные Таблицы 1.3) не уточняется, в какой форме была выбрана частотная зависимость импеданса.

2) В разделе 1.8 не раскрыта причина выбора для практической реализации в численной модели полупрозрачного экрана именно горизонтальных проводящих лент для включения между ними сосредоточенных элементов.

Очевидно, выбор должен быть связан с требуемыми значениями импеданса экрана по отношению к вертикальной поляризации электрического поля, однако выбор геометрии лент и метод расчета номиналов сосредоточенных элементов, представленных в Таблице 1.6, в работе отсутствует.

3) Некоторые номиналы емкостей сосредоточенных элементов в составе полупрозрачного экрана, приведенные в Таблице 1.6, составляют десятые доли пФ, что соизмеримо с конструктивной емкостью щелей между металлическими лентами. Не оценена стабильность получаемой отсечки по отношению к стандартному разбросу номиналов сосредоточенных элементов, имеющему место на практике;



4) При решении аналитической и численной двумерной задачи синтеза импеданса полупрозрачного экрана случаи E- и H-поляризации рассматриваются отдельно. При этом в Главе III в качестве источника используется антенна с круговой поляризацией, в то время как экран оптимизируется по отношению лишь к вертикальной поляризации электрического поля. В работе не уточняются границы применимости данного приближения и степень влияния анизотропии экрана на синтез диаграммы источника с круговой поляризацией в нижней полусфере.

Указанные недостатки не снижают общую высокую оценку работы, которая, по моему мнению, является образцом научного труда высочайшего уровня и вносит значительный вклад в современную теорию и технику антенн.

### Заключение

Таким образом, диссертация Генералова А.А. является законченной самостоятельной квалификационной работой, посвященной решению актуальной прикладной научной задачи. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа полностью соответствует требованиям положения «О порядке присуждения учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Генералов Алексей Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

### Официальный оппонент

Кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник физико-технического факультета Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (ИТМО)

С.Б.Глыбовский

Личную подпись Глыбовского Станислава Борисовича заверяю:



26.11.2019

Адрес организации: 197101 г. Санкт-Петербург, ул. Кронверкский проспект, д.49

Тел.: +7-952-204-8247

E-mail: [s.glybovski@metalab.ifmo.ru](mailto:s.glybovski@metalab.ifmo.ru)