

*На правах рукописи*

**ФЕРСМАН**

Геннадий Александрович

**ЧАСТОТНО – СЕЛЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ  
НА ОСНОВЕ ДВОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
СЕТЧАТЫХ СТРУКТУР.**

Специальность 01.04.03. – радиофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт – Петербург

2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Петрунькин В.Ю.,

Доктор физико-математических наук, профессор Тюхтин А.В.,

Доктор физико-математических наук, начальник сектора Штагер Е.А.

Ведущая организация: Военный университет связи, С-Петербург.

Защита состоится 25 апреля 2002 года в 15 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.01 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, II учебный корпус, ауд. 257.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке университета.

Автореферат разослан 18 марта 2002 года.

Ученый секретарь диссертационного Совета

доктор физико-математических наук,

профессор

И.А.Водоватов

## ЧАСТОТНО - СЕЛЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДВОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕТЧАТЫХ СТРУКТУР.

### Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Настоящая диссертационная работа посвящена электродинамике частотно — селективных металлических сетчатых структур и возможности их практического использования.

Во многих устройствах антенной техники, электроники сверхвысоких частот, радиорелейных линиях и других областях техники в настоящее время широко применяют сетчатые структуры - проволочные сетки с различной формой ячеек и разной конструкции (одинарные, двойные, плоские, искривленные и т. д.), а также перфорированные металлические поверхности.

Интерес к сетчатым структурам вызван объективными причинами. Во-первых, как и сплошные металлические поверхности сетчатые структуры обладают экранирующими (отражательными) свойствами; но в дополнении к этому они с успехом могут быть использованы для создания поляризационных, замедляющих (ускоряющих) и частотно-избирательных электродинамических устройств. Во-вторых, многие системы с сетчатыми структурами имеют несомненные достоинства конструктивного, эксплуатационного и экономического характера.

Электродинамические свойства металлических сетчатых структур зависят от густоты сеток и формы ячеек, от характера контакта между проводниками в перекрестиях ячеек, от направления падения волны и ее поляри-

зации, от формы сечения проводников и их материала. Кроме того, при определении электрических параметров того или иного устройства с сетчатыми структурами необходимо рассматривать конкретную систему возбуждения, форму поверхности сетки и т. д.

На практике часто используются сетки сложной конфигурации, например, образованные системами неортогонально перекрещивающихся проводников с неидеальными контактами в перекрестиях, решетки из радиально расходящихся проводников, структуры, образованные системами криволинейных проводников, расположенных на неплоской поверхности (например, сферические сетчатые экраны). Кроме того, в ряде случаев сетки располагаются вблизи границ раздела слоистых сред. В этих случаях решение дифракционной задачи прямыми методами оказывается весьма затруднительным, так как структура электромагнитного поля вблизи поверхности сетки сложна.

Для решения подобного рода задач целесообразно применять метод усредненных граничных условий, который позволяет непосредственно вычислять необходимые величины с нужной степенью точности, а не искать, как это обычно делается, решения, пригодные вблизи от проводников сетки, а затем уже переходить к приближенным соотношениям, которые и являются конечной целью расчета.

Однако, несмотря на большое многообразие одиночных сеток и на значительную широту их использования на практике, одиночные сетчатые структуры не дают возможности решить целый ряд электродинамических задач, связанных с узкополосной частотной селективностью. Начатые работы по расчетам двойных сетчатых структур открыли целый ряд дополнительных свойств таких

систем по сравнению с одиночными сетчатыми структурами. В цикле работ, даже в частном случае параллельных проводников, выявлены новые по сравнению с одиночными сетками электродинамические свойства рассмотренных структур. Поэтому разработка общей методики и обобщение метода усредненных граничных условий расчета для двойных сетчатых структур актуальна как для решения задач электродинамики, так и для практического проектирования сетчатых устройств специального и общего назначения. Сказанное и определяет **актуальность** темы диссертации.

**Целью** работы является разработка частотно-избирательных систем для электромагнитных волн на основе двухслойных металлических сеток.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие электродинамические задачи:

- получить усредненные граничные условия на поверхностях двойной проволочной сетки при произвольном расстоянии между сетками;
- определить отражающие свойства двойной сетки, состоящей из пересекающихся проводников;
- определить ускоряющие и замедляющие свойства двойных проволочных сеток;
- выявить возможность снижения эффективной площади рассеяния плоской антенной системы, укрытой частотно – селективной рассеивающей сетчатой поверхностью;
- определить электродинамические характеристики антенной системы, укрытой частотно – селективной структурой.

Основным результатом выполненных исследований и представленных в диссертации является дальнейшее развитие метода усредненных граничных условий для электродинамики двойных сетчатых структур, а также применение этого метода для решения ряда задач прикладной электродинамики.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в следующем:

- Впервые получены усредненные граничные условия на поверхности плоской металлической сетки, состоящей из тонких пересекающихся проводников с ячейкой в форме параллелограмма в присутствии другой параллельной металлической сетки.

Найдена функция, учитывающая взаимное влияние сеток; в отдельных частных случаях найденные усредненные граничные условия переходят в известные ранее.

- На основании усредненных граничных условий на поверхностях двойных сеток получены выражения для прошедшей и отраженной электромагнитных волн при произвольном угле падения электромагнитной волны и произвольной ориентации плоскости падения падающей волны относительно систем проводников сеток.

Получено значение коэффициента отражения электромагнитных волн от двойной сетки с квадратной ячейкой. Коэффициент отражения (при идеальном контакте в местах пересечения проводников) в этом случае не зависит от ориентации плоскости падения относительно систем проводников (от угла  $\varphi$ ). Наличие в коэффициенте отражения явно выраженных максимумов, близких к единице, и нулей позволяет сделать вывод о возможности использования двойных сеток в качестве частотно-селективных поверхностей (ЧСП) или экранов с повышенными экранирующими свойствами (по сравнению с одиночными сетками). Найдено условие радиопрозрачности двойной сетчатой структуры.

- Исследованы дисперсионные свойства системы из двух плоских проволочных сеток; найдены уравнения для определения постоянной распространения волн ТЕ- и ТН-типа между сетками и определены их критические длины волн.

- Оптимизирована форма частотно – селективной сетчатой структуры, удовлетворяющей условию радиопрозрачности на рабочей частоте антенной системы и снижающей эффективную площадь рассеяния на нерабочих частотах волноводно – щелевой антенны (плоская волноводно – щелевая антенна в данном случае рассматривается в силу того, что она обладает наибольшими отражающими свойствами по сравнению с антеннами другого типа). Данная структура представляет собой двойную сетчатую поверхность, состоящую из двух ортогонально пересекающихся цилиндров. В приближении физической оптики проведен расчет эффективной площади рассеяния такой частотно – селективной сетчатой поверхности при различных параметрах сеток и цилиндрических поверхностей.

Рассчитаны зависимости эффективной площади рассеяния укрывающей системы (экрана) от углов падения электромагнитных волн при однопозиционном и двухпозиционном исследовании экрана и от длины облучаемой волны. Показано, что в случае металлического экрана (очень густых сеток) эффективная площадь рассеяния системы падает на  $10 \div 15$  дБ.

- Проведен расчет диаграмм направленности в  $E$  - и  $H$  – плоскостях плоской волноводно – щелевой антенны большого (в длинах волн) размера, укрывтой рассеивающей частотно – селективной сетчатой структурой. Показано, что наличие частотно – селективной сетчатой поверхности перед раскрытием антенны увеличивает уровень бокового излучения антенны  $\approx$  на  $5 \div 7$  дБ по сравнению с диаграммой антенны без частотно – селективной сетчатой структуры.

- В целях снижения эффективной площади рассеяния на рабочих частотах проведены расчеты ЭПР деформированной антенной системы, когда

часть апертуры смещается вдоль излучения относительно другой части на четверть длины волны, при разбиении апертуры антенны на две или на четыре равные части. В первом случае снижение эффективной поверхности рассеяния составляет - 3,4 дБ, а во втором - на -6,2 дБ.

**Научная значимость** диссертационной работы заключается в том, что полученные в ней усредненные граничные условия для двойных сетчатых структур позволяют значительно упростить решение задач с использованием двойных сетчатых структур и, тем самым существенно расширить круг электродинамических задач.

**Практическая ценность** диссертационной работы состоит в том, что ее результаты могут быть непосредственно использованы при разработках частотно-селективных экранов с целью создания экранирующих сетчатых систем с большими экранирующими свойствами или радиопрозрачных укрытий.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в учреждениях РАН (САО, ИПА), вузах (СПбГУ, СПбГТУ, МГУ), отраслевых институтах (НИИ дальней радиосвязи, НИИ авиационных систем и др.)

**Апробация работы.** Основные результаты доложены и обсуждены на следующих конференциях:

- XXV Всесоюзная Научно - техническая конференция “Антенны и устройства СВЧ”. Москва, 1987.
- I Всесоюзная Научно - техническая конференция “Устройства и методы прикладной электродинамики”. Одесса, 1988.
- I Всесоюзный Научно – технический семинар “Устройства и методы расчета зеркальных антенн”. Свердловск, 1989.



- Международной симпозиум по теории электромагнетизма. Швеция, Стокгольм. 1989.
- Всесоюзный научно-техническое совещание – семинар “Рассеяние электромагнитных волн”. Таганрог, 1989.
- X Международный симпозиум по электромагнитной совместимости. Польша, Вроцлав. 1990.
- IV Всероссийская научно-методическая конференция. СПб, 2000.
- VI региональная конференция по распространению радиоволн. СПбГУ, 2000.
- VII региональная конференция по распространению радиоволн. СПбГУ, 2001.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликована одна монография [77], 23 печатных работы, получено 3 свидетельства на изобретение.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения и списка основной литературы, насчитывающей 105 наименования. Общий объем диссертации 267 страниц, включая 123 рисунка и 7 таблиц.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Усредненные граничные условия на поверхности плоской густой сетки, состоящей из пересекающихся тонких проводников, с ячейкой в форме параллелограмма в присутствии другой параллельной сетки; функция, учитывающая взаимное влияние сетчатых поверхностей. Учет взаимного влияния сетчатых поверхностей необходим при расстояниях между сетками менее половины характерного размера ячейки.

2. Соотношения для коэффициентов прохождения и отражения электромагнитных волн от двойной сетчатой структуры, полученные с помощью выведенных усредненных граничных условий, хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, что доказывает адекватность использования полученных усредненных граничных условий.
3. Дисперсионные свойства двойной сетчатой структуры, показывают возможность распространения электромагнитных волн между сетками с различными фазовыми скоростями (как меньше, так и больше скорости в свободном пространстве). Критические длины волн, полученные из условия распространения электромагнитных волн вдоль сеток с использованием усредненных граничных условий, хорошо согласуются с результатами экспериментальной проверки, что также подтверждает адекватность математической модели.
4. Частотно-селективная сетчатая поверхность (экран), расположенная перед плоским раскрытием волноводно-щелевой антенны, обеспечивает снижение ее эффективной площади рассеяния на 16 дБ; на рабочих частотах антенной системы экран радиопрозрачен за счет резонансных свойств двойной сетчатой структуры.
5. Определено снижение коэффициента усиления и увеличения уровня бокового излучения волноводно – щелевой антенны при практическом изготовлении частотно – селективного сетчатого экрана со статистическими ошибками. Среднее значение ошибок в рассматриваемых (наиболее часто встречающихся на практике) случаях равно нулю, а дисперсия  $\sigma^2 = 0,005$  и  $0,01$ .
6. Снижение радиолокационной заметности антенной системы на рабочей частоте путем деформации апертуры. При этом эффективная площадь рассеяния снижается более чем на 6 дБ.
7. На основе двухслойной густой сетчатой структуры создана укрывающая система для антенны, работающей на двух частотах излучения, за счет прорезания резонансных щелей в сетках.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновываются актуальность проблемы, формулируется цель и задачи работы и приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** получены усредненные граничные условия на поверхности плоской сетки, состоящей из тонких пересекающихся проводников с ячейкой в форме параллелограмма в присутствии другой параллельной сетки. Эти усредненные граничные условия получены при следующих ограничениях, накладываемых на параметры сеток:

$$r_0 \ll a, b \ll \lambda,$$

$$d_{max} / \sin\alpha \ll \lambda,$$

где  $d_{max}$  – максимальное расстояние между параллельными проводниками каждой сетки,  $a$  и  $b$  – размеры ячейки сетки,  $\alpha$  – угол между системами проводников сетки,  $\lambda$  – длина волны.

Найдена функция, учитывающая взаимное влияние сеток; в отдельных частных случаях найденные усредненные граничные условия переходят в известные ранее.

В конце главы произведена оценка погрешности расчетов электромагнитных полей, которая связана с заменой дискретных токов проводов распределенными по поверхности сетки токами (усредненными граничными условиями). Показано, что для достаточно тонких сеток ( $b/r_0 \geq 10$ ) максимальная погрешность становится малой величиной на расстоянии от сетки, равному примерно половине периода сетчатой структуры.

**Во второй главе** на основании усредненных граничных условий на поверхностях двойных сеток получены выражения для прошедшей и отраженной электромагнитных волн при произвольном угле падения и произвольной ориен-

тации плоскости падения падающей волны относительно систем проводников сеток.

При произвольной ориентации плоскости падения электромагнитной волны (угла  $\varphi$ ) относительно проводников сетки получено значение коэффициента отражения электромагнитных волн от двойной сетки с квадратной ячейкой, а для  $\varphi = 0, \pi/2$  получены значения коэффициентов отражения от двойной сетки с прямоугольной ячейкой. Наличие в зависимости коэффициента отражения от длины волны явно выраженных максимумов, близких к единице, и нулей позволяет сделать вывод о возможности использования двойных сеток в качестве частотно-селективных сетчатых поверхностей (ЧСП) или экранов с повышенными экранирующими свойствами (по сравнению с одиночными сетками).

Теоретическое исследование значений коэффициентов отражения от двойной сетки с учетом взаимного влияния между двумя сетками показало необходимость этого учета при малых расстояниях между сетками. Не учет взаимного влияния может привести в ряде случаев к значительным погрешностям в определении коэффициентов отражения.

Экспериментальная проверка значений коэффициентов отражения показала хорошее согласие с теорией.

**Третья глава** посвящена исследованию дисперсионных свойства системы из двух плоских проволочных сеток при распространении электромагнитных волн между ними; найдены уравнения для определения постоянной распространения волн между сетками для волн  $TE$  - и  $TN$  – типа. При распространении  $TE$  - волны между сетчатыми поверхностями наблюдается увеличение фазовой скорости. Это не зависит от того, состоят ли сетки из параллельных проводов, или они представляют собой систему пересекающихся под прямым углом проводников. Данный результат для очень густых сеток переходит в известный ранее для распространяющейся  $TE$  – волны в плоском волноводе.

Электромагнитная  $ТН$  - волна распространяется между сетками с прямоугольными ячейками с фазовой скоростью, которая может быть и больше и меньше фазовой скорости волны в свободном пространстве. Это зависит от параметров системы и длины волны.

Найдены критические длины волн, которые совпадают для  $ТЕ$  - и  $ТН$  - типов. Ускоряющие и замедляющие свойства сетчатых поверхностей проверены экспериментально. Эксперимент показал хорошее согласие с теорией.

**В четвертой главе** оптимизирована форма частотно – селективной сетчатой поверхности, предназначенной для снижения эффективной площади рассеяния плоской волноводно-щелевой антенны на нерабочих частотах и удовлетворяющей условию радиопрозрачности на рабочей частоте антенной системы. Данная поверхность представляет собой двойную сетчатую поверхность, состоящую из двух ортогонально пересекающихся цилиндров.

В приближении физической оптики проведен расчет эффективной площади рассеяния такой оптимизированной частотно – селективной сетчатой поверхности при различных параметрах сеток и цилиндрических поверхностей.

Расчет проводился для двух видов оснований частотно – селективной сетчатой поверхности – квадратного и круглого. Рассчитаны зависимости эффективной площади рассеяния от углов падения электромагнитных волн при однопозиционном и двухпозиционном расположении экрана антенны и зависимости эффективной площади рассеяния от длины облучаемой волны. Показано, что даже в случае металлического экрана (очень густых сеток) эффективная площадь рассеяния системы падает на 16 дБ.

Учет сетчатости экрана в этой главе осуществляется с использованием усредненных граничных условий на сетках и полученных во второй главе коэффициентов отражения от двойных сеток. Экспериментальная проверка проводилась на установке, в которой исследуемые образцы помещались на движущуюся платформу и, благодаря доплеровскому сдвигу частот, рассеянное поле

от исследуемых образцов отделялось от всевозможных отражений от местных предметов. Исследовались модели экрана с квадратным и круглым основанием и разной высотой экрана над основанием.

**В пятой главе** проведен расчет диаграмм направленности плоской волноводно – щелевой антенны большого (в длинах волн) размера, укрытой рассеивающей частотно – селективной сетчатой поверхностью. Расчет диаграммы направленности проводился методом касательной плоскости. Рассчитаны диаграммы излучения в  $E$  - и  $H$  – плоскостях для различных параметров частотно – селективной сетчатой поверхности; из их анализа можно сделать вывод, что наличие частотно – селективной сетчатой поверхности перед раскрывом увеличивает уровень бокового излучения антенны  $\approx$  на  $5 \div 7$  дБ по сравнению с диаграммой антенны без частотно – селективной сетчатой поверхности в случае «точного» изготовления экрана.

При изготовлении частотно – селективной сетчатой поверхности со случайными ошибками диаграммы излучения антенной системы искажаются, увеличивается боковое излучение и «замываются» нули и минимумы диаграммы.

В главе рассмотрены два варианта возможных фазовых ошибок частотно – селективной сетчатой поверхности: линейно независимых и коррелированных.

**Шестая глава** посвящена вопросам снижения эффективной поверхности рассеяния деформированной антенной системы, когда часть апертуры смещается вдоль излучения относительно другой части на четверть длины волны при разбиении круглой апертуры на два полукруга или на четыре четверти круга.

Снижение эффективной поверхности рассеяния при этом составляет - 3,4 дБ при делении апертуры пополам, и на -6,2 дБ при делении апертуры на четыре части. Экспериментальная проверка показывает удовлетворительное согласие с теоретическими положениями.

**В седьмой главе** рассмотрена возможность создания двухчастотной частотно-селективной сетчатой поверхности путем прорезания резонансных щелей в густой сетчатой поверхности. Предполагается, что сигналы двух частот достаточно сильно разнесены друг от друга по частотам и поляризованы ортогонально. В этом случае наличие регулярных разрывов проводников сеток в виде узких щелей не нарушает условий прохождения электромагнитных волн с поляризацией поля, при которой электрический вектор параллелен щелям и щели не возбуждаются.

С другой стороны, решетки щелей относительно большой длины, прорезанные в обоих слоях сеток, практически не влияют на частоту резонанса двухслойной структуры сетчатого типа, определяемую заданным расстоянием между слоями при заданном размере ячейки и ширине проводника. Резонансная частота сохраняется для амплитудно-частотной характеристики обоих коэффициентов прохождения.

Наличие щелей практически не изменяет угловые зависимости всех измеренных показателей двухслойной ЧСП, т.е. угловые зависимости амплитудно-частотной характеристики целиком определяются двухслойной сетчатой резонансной структурой.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Получены усредненные граничные условия на поверхности плоской сетки, состоящей из тонких пересекающихся проводников с ячейкой в форме параллелограмма в присутствии другой параллельной сетки.

Найдена функция, учитывающая взаимное влияние сеток; в отдельных частных случаях найденные усредненные граничные условия переходят в известные ранее; при малых расстояниях между сетками существенно сказывается взаимное влияние сеток, в ряде случаев могущее привести к значительному от-

лично результатов при различной ориентации проводников одной сетки относительно другой.

Произведена оценка погрешности расчетов электромагнитных полей, которая связана с заменой дискретных токов проводов распределенными по поверхности сетки токами (усредненными граничными условиями). Показано, что для достаточно тонких сеток ( $b/r_0 \geq 10$ ) максимальная погрешность становится малой величиной на расстоянии от сетки, равному примерно половине периода сетчатой поверхности.

2. На основании усредненных граничных условий на поверхностях двойных сеток получены выражения для прошедшей и отраженной электромагнитных волн при произвольном угле падения и произвольной ориентации плоскости падения падающей волны и выражения для коэффициентов отражения электромагнитных волн от двойной сетки. Коэффициент отражения для сетки с квадратной ячейкой не зависит от ориентации плоскости падения относительно систем проводников (от угла  $\varphi$ ).

Найдены условия радиопрозрачности двойных сетчатых структур для  $E$  и  $H$  падающих электромагнитных волн.

3. Исследованы дисперсионные свойства системы из двух плоских проводящих сеток; найдены уравнения для определения постоянной распространения электромагнитных волн между сетками. Определены критические длины волн, которые совпадают для  $E$  - и  $H$  - типов.

4. Оптимизирована форма частотно - селективной сетчатой поверхности, удовлетворяющей условию радиопрозрачности на рабочей частоте антенной системы и снижающей эффективную поверхность рассеяния на нерабочих частотах волноводно - щелевой антенны. Данная поверхность представляет собой двойную сетчатую поверхность, состоящую из двух ортогонально пересекающихся цилиндров. В приближении физической оптики проведен расчет эффективной поверхности рассеяния такой специальной частотно - селективной сет-



чатой поверхности при различных параметрах сеток и цилиндрических поверхностей.

Учет сетчатости экрана осуществлялся с использованием усредненных граничных условий на сетках и полученных во второй главе коэффициентов отражения от двойных сеток. Показано, что на нерабочих частотах для круглой апертуры снижение эффективной поверхности рассеяния осуществляется более чем на 16 дБ.

5. Рассчитаны диаграммы излучения в  $E$  - и  $H$  - плоскостях для различных параметров частотно - селективной сетчатой поверхности; из их анализа можно сделать вывод, что наличие частотно - селективной сетчатой поверхности перед раскрывом увеличивает уровень бокового излучения антенны  $\cong$  на 5 - 7 дБ по сравнению с диаграммой антенны без частотно - селективной сетчатой поверхности в случае «точного» изготовления экрана.

Рассмотрены два варианта возможных фазовых ошибок частотно - селективной сетчатой поверхности: линейно независимых и коррелированных; принимается, что случайная величина распределена по случайному закону с нулевым средним значением и дисперсией  $\sigma^2$ , не зависящей от координат. При  $\sigma^2 = 0,01$  величина первого бокового лепестка увеличивается на 2,5 дБ в  $H$ -плоскости и на 5 дБ в  $E$  — плоскости.

6. Проведены расчеты эффективной поверхности рассеяния деформированной апертуры антенной системы, когда часть апертуры смещается вдоль излучения относительно другой части на четверть длины волны при разбиении круглой апертуры на два полукруга или на четыре четверти круга. Снижение эффективной площади рассеяния при этом составляет - 3,4 дБ при делении апертуры пополам, и на-6,2 дБ при делении апертуры на четыре части.

7. Создана двухчастотная двойная металлическая сетчатая поверхность, которая реализована наличием регулярных разрывов проводников сеток в виде узких щелей. Решетки щелей относительно большой длины, прорезанные в обоих слоях сеток, практически не влияют на частоту резонанса двухслойной

структуры сетчатого типа, определяемую заданным расстоянием между слоями при заданном размере ячейки и ширине проводника. Резонансная частота сохраняется для амплитудно-частотной характеристики обоих коэффициентов прохождения.

Наличие узких щелей практически не изменяет угловые зависимости всех измеренных показателей двухслойной частотно - селективной сетчатой поверхности, т.е. угловые зависимости амплитудно-частотной характеристики целиком определяются двухслойной сетчатой резонансной структурой. Все вышесказанное позволяет сделать вывод о перспективности предложенной электродинамической структуры в качестве двухчастотной ЧСП.

Все модельные задачи, рассмотренные в диссертационной работе, доведены до численных результатов, которые приведены в виде графического материала. Это потребовало разработки вычислительных алгоритмов, написания и отладки программ, реализующих эти алгоритмы.

**В приложении** с помощью результирующего показателя производится оценка влияния изменения различных параметров системы (как в лучшую, так и в худшую сторону) на ее основные технические характеристики и сформулированы основные результаты диссертационной работы.

### **Основные публикации по материалам диссертации**

1. Астрахан М.И., Ферсман Г.А. Усредненные граничные условия и коэффициенты отражения двойной густой решетки тонких параллельных металлических нитей. Радиотехника и электроника, 1978. Т.23, №7. С.1359-1364.
2. Ферсман Г.А. Усредненные граничные условия для двойной густой решетки тонких пересекающихся проводников. Л., НИИ ЭИР, 1980, № 3 – 6634.
3. Астрахан М.И., Ферсман Г.А.. О расчете дифракционного поля излучателя, расположенного на сетчатой периодически неровной поверхности конечной

длины. Рассеяние и дифракция радиолокационных сигналов и их информативность. Труды СЗПИ, Л., 1981. С. 30 – 35.

4. Конторович М.И., Астрахан М.И., Акимов В.П., Ферсман Г.А.. Электродинамика сетчатых структур. М.: Радио и связь. 1987. 134 с.
5. Астрахан М.И., Золотухина Н.М., Ферсман Г.А. Тезисы доклада на XXV Всесоюзной НТК. Москва, 1987.
6. Астрахан М.И., Ферсман Г.А. Применение двойных сетчатых поверхностей в зеркальных антеннах. Тезисы доклада на I Всесоюзной НТК “Устройства и методы прикладной электродинамики”. Одесса, 1988.
7. Астрахан М.И., Жуков А.Д., Королева Н.В., Ферсман Г.А. Тезисы доклада на I Всесоюзном НТС “Устройства и методы расчета зеркальных антенн”. Свердловск, 1989.
8. Акимов В.П., Астрахан М.И., Ферсман Г.А. Тезисы доклада на Международном симпозиуме по теории электромагнетизма. Швеция, Стокгольм. 1989.
9. Г.А.Ферсман. Л.А.Бабенко. Тезисы доклада на Всесоюзном научно-техническом совещании – семинаре “Рассеяние электромагнитных волн”. Таганрог, 1989.
10. Астрахан М.И., Акимов В.П., Ферсман Г.А. Тезисы доклада на X Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости. Польша, Вроцлав. 1990.
11. Ферсман Г.А., Астрахан М.И., Ляпунова Н.М. Частотно-селективная поверхность. Заявка на изобретение № 4856710/09. Авторское свидетельство. 1991.

12. Ферсман Г.А., Бабенко Л.А., Королева Н.В. Эффективная поверхность рассеяния экрана, образованного пересечением 2-х цилиндров. Рассеяние электромагнитных волн. Таганрог, 1991, вып 8. С. 90 – 94.
13. Астрахан М.И., Ферсман Г.А., Аксенова Т.А. Снижение обратного рассеяния плоской антенны за счет изменения ее профиля. Вопросы электромагнитной совместимости и расчета антенн и радиолиний. Военная академия связи, СПб, 1991. С. 86 – 93.
14. Ферсман Г.А., Бабенко Л.А. Эффективная поверхность рассеяния выпуклого сетчатого экрана специальной формы. Вопросы электромагнитной совместимости и расчета антенн и радиолиний. Военная академия связи, СПб, 1991. С. 93 – 100.
15. Астрахан М.И., Ферсман Г.А., Ляпунова Н.М. Частотно-селективная поверхность. Патент на изобретение №2012964. Госреестр изобретений. 15.05.1994.
16. Астрахан М.И., Ферсман Г.А., Ляпунова Н.М. Частотно-селективная поверхность. “Бюллетень изобретений”. 1994. №9.
17. Ферсман Г.А., Бабенко Л.А. Рассеяние электромагнитной волны частотно-селективным выпуклым экраном конечных размеров. Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 8-9. С. 1271 – 1276.
18. Астрахан М.И., Ферсман Г.А., Ляпунова Н.М. Двухчастотная сетчатая структура с резонансными щелями. Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 10. С. 1476 – 1479.
19. Astrakhan M.I., Fersman G.A. Two-Frequency Grid Structure with Resonant Slots. Journal of Communications Technology and Electronics. 1994. № 39. P. 17 – 28.

20. Ипатов А.В., Крат О.И., Ферсман Г.А., Иванов Д.В. Использование селективных поверхностей для антенно-фидерных устройств антенной сети «Квазар». Сборник “Проблемы современной радиоастрономии”. СПб. 1997. Т3. С. 82 – 96.
21. Ферсман Г.А., Бабенко Л.А. Рассеяние электромагнитных волн частотно-селективной поверхностью выпуклой формы. Рассеяние электромагнитных волн. Таганрог, 1997. вып. 10. С. 22 – 29.
22. Ферсман Г.А., Бабенко Л.А. Рассеяние электромагнитных волн выпуклым экраном апертурной антенной системы. Рассеяние электромагнитных волн. Таганрог. 1999. вып. 11. С. 9 – 14.
23. Ферсман Г.А., Бабенко Л.А. Уменьшение рассеяния электромагнитных волн апертурных антенн. "Фундаментальные исследования в технических университетах". Тезисы доклада на IV Всероссийской научно-методической конференции. СПб, 2000. С. 79.
24. Ферсман Г.А. Электродинамические характеристики двухдиапазонных пространственных фильтров". Тезисы доклада на VI региональной конференции по распространению радиоволн. Сборник СПбГУ, 2000. С. 7.
25. Ферсман Г.А. Уменьшение рассеяния электромагнитных волн апертурными антеннами. Тезисы доклада на VI региональной конференции по распространению радиоволн. Сборник СПбГУ, 2000. С. 8.
26. Ферсман Г.А. Снижение эффективной поверхности рассеяния плоской волноводно-щелевой антенны на рабочей длине волны. Тезисы доклада на VI региональной конференции по распространению радиоволн. Сборник СПбГУ, 2000. С. 9.

27. Ферсман Г.А. Снижение радиолокационной заметности плоских апертурных антенн. Тезисы доклада на VII региональной конференции по распространению радиоволн. Сборник СПбГУ, 2001. С. 41.