

На правах рукописи

Мельчакова Ирина Валерьевна

**Аналитическое моделирование
искусственных электромагнитных
поверхностей**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена на кафедре физики Государственного образовательного учреждения Высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Симовский Константин
Руфович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Вендик Ирина Борисовна

кандидат физико-математических наук,
доцент Масловский Станислав
Игоревич

Ведущая организация: Военная академия связи им. С.М.
Буденного

Защита состоится 20 ноября 2008 года в 18.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при Государственном образовательном учреждении Высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, 2-ой учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Государственного образовательного учреждения Высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан “ 15” октября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.01
доктор технических наук, профессор

Коротков А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ:

Данная диссертационная работа посвящена аналитическому моделированию искусственных электромагнитных поверхностей. Интерес к таким структурам и их приложениям появился около десяти лет назад. Это обусловлено их необычными свойствами, а именно: наличием резонансной полосы, в пределах которой структура обладает высоким импедансом и ведет себя как магнитный проводник, и наличием полосы непрозрачности для поверхностных волн. Благодаря своему первому свойству эти структуры получили следующие названия: искусственные магнитные проводники, искусственные импедансные поверхности, поверхности с высоким импедансом, резонансные периодические поверхности, а благодаря второму – структуры с полосой непрозрачности, планарные фотонные кристаллы, периодические поверхности. Объединяя все эти названия и свойства рассматриваемых структур, мы будем их называть искусственными электромагнитными поверхностями (ИЭП).

Актуальность

Работа посвящена исследованию дисперсионных и отражательных свойств искусственных электромагнитных поверхностей, которые привлекают большой интерес в последнее время. ИЭП, благодаря своим свойствам, имеют широкий спектр применения, например, в волноводах, в качестве пространственных и частотных фильтров, в антенной технике - для улучшения параметров антенн, а именно для невыступающих, в основном печатных, антенн в качестве резонансной подложки, которая на частоте резонанса поверхностного импеданса становится магнитной стенкой. Такая подложка должна обеспечивать отражение горизонтально поляризованного поля, созданного печатной антенной с коэффициентом отражения, равным $+1$, что эквивалентно удвоению излучающего момента антенны. Для получения подобного результата с помощью диэлектрического слоя, расположенного на заземляющей плоскости, потребовался бы диэлектрик толщиной в четверть длины волны (в среде), что для многих практических приложений неприемлемо. Кроме того, в таких толстых

диэлектрических подложках расположенный на них излучатель эффективно генерирует волны, бегущие вдоль заземляющей плоскости, что приводит к снижению коэффициента усиления антенны.

В связи с крайней сложностью электромагнитных процессов в подобных структурах анализ их дисперсионных и отражательных свойств часто производится численными методами. Существует множество численных моделей прохождения электромагнитных волн в ИЭП, основанных на таких методах, как FDTD или MoM (методов моментов). Что касается аналитических моделей, то наиболее известной является оригинальная квазистатическая модель. Недостаток этой модели заключается в том, что она позволяет рассчитывать коэффициент отражения только для нормально падающей плоской волны. Однако реальная антенна расположена в ближней зоне ИЭП, и поэтому создает не одну плоскую волну, нормально падающую на ИЭП, а более-менее широкий их угловой спектр. Соответственно, необходимо знать поведение таких структур для любых углов падения плоских волн. Кроме того, антенна создает также неоднородно плоские волны, т.е. пространственные гармоники излучения, экспоненциально затухающие в свободном пространстве при удалении от антенны вдоль некоторого направления. Эти, так называемые эванесцентные волны, могут возбуждать поверхностные волны в такой периодической структуре, как ИЭП. Поэтому создание простой и эффективной аналитической модели, позволяющей с достаточной точностью рассчитывать обе основные характеристики ИЭП (и дисперсионную диаграмму поверхностных волн, и фазовую диаграмму), является важным аспектом в теории ИЭП. Такая модель позволит быстро очертить интервалы оптимальных параметров структуры, и тем самым ускорить и упростить этап проектирования.

Научная новизна

Аналитическое моделирование ИЭП является одним из важнейших направлений исследования современных электромагнитных материалов. В данной диссертационной работе предлагается метод, позволяющий без привлечения сложных численных вычислений получать достоверную информацию об отражательных и о дисперсионных свойствах ИЭП. Рассматриваемая модель по сравнению с известной квазистатической моделью ИЭП позволяет рассчитывать

коэффициент отражения при различных углах падения и типах поляризации падающей волны, что крайне важно, так как полоса частот, где ИЭП ведет себя как магнитный проводник, может изменяться в зависимости от этих углов. В работе показано, что для получения основных характеристик ИЭП достаточно уметь рассчитывать поверхностный импеданс структуры. Для расчета поверхностного импеданса нескольких типов ИЭП были получены оригинальные формулы. Показано, что резонанс ИЭП, состоящей из резонансной сетки, расположенной на металлизированном диэлектрическом слое, не содержащем вертикальные металлические перемычки, является менее зависимым от угла падения волны по сравнению с другими стандартными ИЭП.

В работе также продемонстрирована высокая точность расчета дисперсионных диаграмм для различных типов ИЭП при помощи предлагаемой аналитической модели, т.е. предсказанный данной моделью поверхностный импеданс остается таким же при переходе к эванесцентным волнам, т.е. к комплексным углам падения. Для того, чтобы избежать потерь и искажений диаграммы направленности, связанных с возбуждением поверхностных волн в подложке, частота антенны должна лежать в запрещенной зоне для поверхностных волн ИЭП. Если на этой частоте ИЭП также имеет высокий поверхностный импеданс для всех вещественных углов падения, польза от применения ИЭП в качестве подложки печатной антенны вместо обычного диэлектрика не подлежит сомнению.

В работе также рассмотрены ИЭП, образованные двумерной решеткой рассеивающих центров магнитного (петлевого) типа с емкостными нагрузками. Для таких ИЭП показано, что они в случае освещения их плоскими электромагнитными волнами, могут рассматриваться как слой искусственной магнитной среды на металлической плоскости и описываться в терминах эффективной магнитной проницаемости, которая в работе вычисляется аналитически.

Цели

Целями данной работы являются:

- построение законченной аналитической модели, позволяющей с высокой точностью рассчитывать основные характеристики искусственных электромагнитных поверхностей: фазовой диаграммы коэффициента отражения и дисперсионной диаграммы поверхностных волн;

- демонстрация хорошей угловой стабильности резонансной частоты ИЭП, состоящей из резонансной сетки, расположенной на металлизированном снизу диэлектрическом слое, по сравнению со стандартными ИЭП, которые содержат металлические перемычки;

- построение аналитической модели, позволяющей рассчитывать «эффективную магнитную проницаемость» искусственных электромагнитных поверхностей на основе решетки резонансных магнитных рассеивателей.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

- Исследовано отражение плоских волн от ИЭП для различных углов падения и двух типов поляризации волн и проведен численный анализ при помощи программного пакета Ansoft HFSS для ИЭП, состоящих из резонансной сетки, расположенной на металлизированном снизу диэлектрическом слое (содержащем металлические «ножки» и без них), и для ИЭП, состоящих из дополняющего щелевого экрана к резонансной сетке, также расположенного на металлизированном снизу диэлектрическом слое, а кроме того для ИЭП из массива пластин, находящихся на металлизированном диэлектрическом слое.

- Проведено сравнение фазовых диаграмм, полученных аналитически и при помощи моделирования, стандартных ИЭП, которые содержат металлические перемычки и ИЭП, состоящих из резонансной сетки, расположенной на металлизированном снизу диэлектрическом слое.

- Исследовано распространение поверхностных волн над различными типами ИЭП и построены диаграммы поверхностных волн при помощи аналитической модели и точного численного моделирования.

- Рассчитана эффективная магнитная проницаемость ИЭП на основе резонансных магнитных рассеивателей при помощи теоретической модели и точного численного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. ИЭП, образованные тонким диэлектрическим слоем, заземляющей плоскостью с одной его стороны и планарной металлической решеткой с другой его стороны, обладают резонансной частотой, менее чувствительной к изменениям угла падения плоской электромагнитной волны, чем стандартные ИЭП (содержащие металлические перемычки, соединяющие заземляющую плоскость и металлическую решетку).

2. Аналитическая модель поверхностного импеданса ИЭП, основанная на упрощающем предположении о параллельном соединении двух независимых друг от друга импедансов – собственного импеданса решетки и поверхностного импеданса металлизированного снизу диэлектрического слоя, позволяет с высокой точностью рассчитывать коэффициент отражения падающей волны от ИЭП для произвольных углов падения.

3. Аналитическая модель поверхностного импеданса ИЭП, основанная на упрощающем предположении о параллельном соединении двух независимых друг от друга импедансов – собственного импеданса решетки и поверхностного импеданса металлизированного снизу диэлектрического слоя, позволяет с высокой точностью рассчитывать дисперсионные диаграммы поверхностных волн над ИЭП.

4. ИЭП, образованные двумерной решеткой рассеивающих центров магнитного (петлевого) типа с емкостными нагрузками, могут быть применительно к задаче об отражении плоских электромагнитных волн с достаточной точностью описаны как слой искусственной магнитной среды на металлической плоскости, причем магнитная проницаемость этой среды вычисляется аналитически.

Практическая ценность:

Представленная в работе аналитическая модель может быть использована для анализа основных характеристик ИЭП и возможности подбора необходимых параметров структур для достижения поставленной цели, не прибегая к численному моделированию, которое занимает много времени.

Апробация работы

Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на: международной конференции ESA (Santiago de Compostela, Spain, 2004) и на 11-м международном студенческом семинаре «Microwave applications of novel physical phenomena» (Санкт-Петербург, 2004).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в статьях и научных работах (всего 6 публикаций, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах и 2 публикации в материалах международных конференциях), список которых приведен в конце автореферата.

Достоверность

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается согласием теоретических вычислений и результатов точного численного моделирования.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из трех глав, введения, заключения, списка литературы, двух приложений. Работа содержит 119 страниц, 76 рисунков; список использованных источников содержит 45 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В данной работе развита аналитическая модель ИЭП, позволяющая рассчитывать с высокой точностью поверхностный импеданс структуры для различных углов падения, в том числе и для комплексных углов (что соответствует распространению поверхностных волн). Аналитическая модель проверена при помощи точного численного моделирования, с использованием программного пакета Ansoft HFSS. А также показано, что ИЭП на основе петлевых резонансных элементов (ПРЭ) могут рассматриваться как искусственный магнитный материал,

и, соответственно, могут быть адекватно описаны при помощи понятия «эффективной магнитной проницаемости».

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложения.

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели работы и решаемые в ней задачи, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

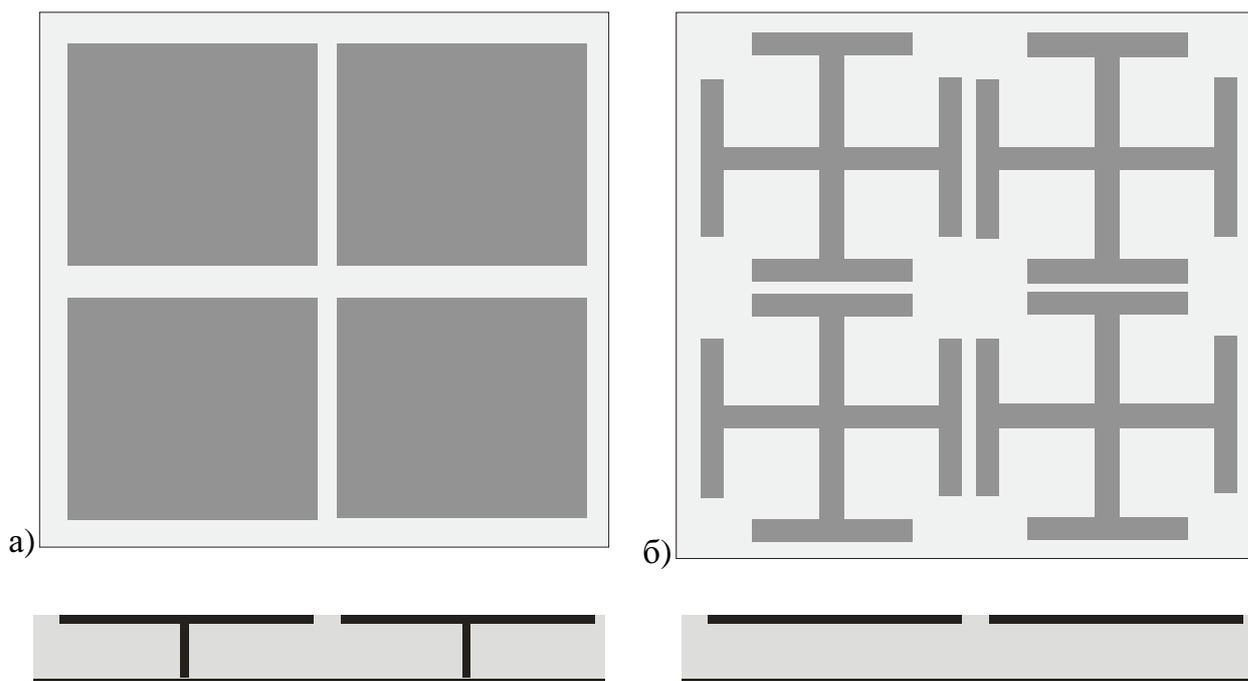


Рис.1. Возможные типы ИЭП. а) стандартная ИЭП типа «грибная поляна»; б) ИЭП, состоящие из резонансной сетки (сетка из Иерусалимских крестов), расположенной на металлизированном снизу диэлектрическом слое.

Первая глава диссертационной работы содержит обзор литературы в области искусственных электромагнитных поверхностей. Прежде всего, рассмотрены основные характеристики и типы ИЭП. Выделено четыре основных типа ИЭП: стандартная ИЭП типа «грибная поляна», предложенная Сивенпайпером в 1998 году; ИЭП, состоящие из резонансной сетки (РС), расположенной на металлизированном снизу диэлектрическом слое; ИЭП, состоящие из дополняющего к РС экрана, расположенного на металлизированном снизу диэлектрическом слое; ИЭП, на основе ПРЭ, расположенных в диэлектрическом слое. Кроме того, в главе рассматриваются некоторые возможные

применения искусственных электромагнитных поверхностей. Например, для малых антенн для улучшения их характеристик, для получения полых волноводов без дисперсии; для создания высокоэффективных полосовых и режекторных фильтров, а также для подавления шумового тока в быстродействующих многослойных микросхемах и другие. Широкий спектр применения ИЭП обеспечивается их свойствами.

Далее в первой главе рассмотрены основные недостатки стандартных ИЭП таких как, например, «грибы». Основной недостаток данных структур заключается в том, что их поверхностный импеданс $Z_{\text{пов}}$ зависит от угла падения волны и типа ее поляризации, а это в свою очередь приводит к появлению двух функций $Z_{\text{пов}}^{TE}(\omega, \theta)$ и $Z_{\text{пов}}^{TM}(\omega, \theta)$. А при практическом изготовлении ИЭП одним из ключевых требований (наряду с максимально допустимой толщиной и минимально требуемой шириной резонансного диапазона частот) является то, что такая поверхность должна действовать как искусственный магнитный проводник для всего спектра волн излучаемого антенной, т.е. для всех углов падения волны, а не только для нуля. Поэтому основные положительные результаты, получаемые при использовании таких ИЭП, связаны скорее с тем, что они могут хорошо подавлять поверхностные волны в определенном диапазоне частот, а не потому что они работают как магнитный проводник.

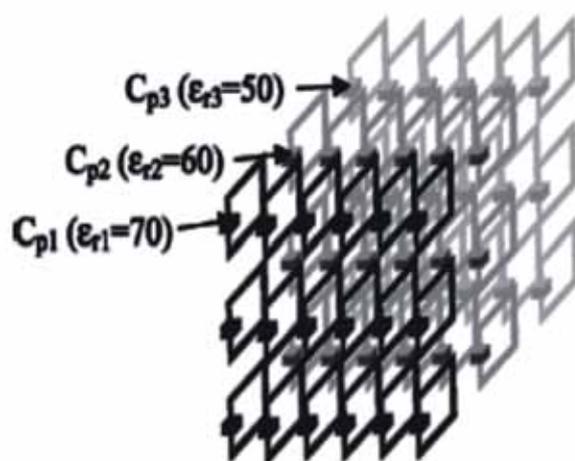


Рис.2. Пример ИЭП на основе ПРЭ.

Во второй главе рассматривается аналитическая модель поверхностного

импеданса ИЭП $Z_{\text{пов}}$, основанная на упрощающем предположении о параллельном соединении двух независимых друг от друга импедансов – собственного импеданса решетки $Z_{\text{реш}}$ и поверхностного импеданса металлизированного снизу диэлектрического слоя $Z_{\text{д}}$:

$$Z_{\text{пов}} = \frac{Z_{\text{реш}} \cdot Z_{\text{д}}}{Z_{\text{реш}} + Z_{\text{д}}}. \quad (1)$$

При использовании этой модели молчаливо предполагается, что значение $Z_{\text{реш}}$ не зависит от наличия металлической плоскости при $z = -h$. Это предположение было успешно доказано Д. Пендри и др. в 1999 г. Было показано, что ошибка, связанная с этим приближением, очень мала для практически важных случаев. Резонанс, при котором структура ведет себя как магнитная стенка, определяется из условия: $X_{\text{реш}}(\omega) + X_{\text{д}}(\omega) = 0$, где $X_{\text{реш}}(\omega) = \text{Im}\{Z_{\text{реш}}(\omega)\}$ и $X_{\text{д}}(\omega) = \text{Im}\{Z_{\text{д}}(\omega)\}$. Решение этого уравнения обозначим как $\omega = \omega_0$. Так как металлизированная снизу диэлектрическая подложка может быть рассмотрена как короткая линия передачи для плоских волн, и ее поверхностный импеданс $Z_{\text{д}} = R_{\text{д}} + jX_{\text{д}}$ в случае тонкой подложки ($h < \lambda_{\text{д}}/4$, где $\lambda_{\text{д}} = \lambda/\sqrt{\epsilon_r}$ длина волны в диэлектрике) является индуктивным, то для получения резонанса необходимо при $z = 0$ расположить структуру с емкостным импедансом: $\text{Im}Z_{\text{сет}} \equiv X_{\text{сет}} < 0$. В качестве такой структуры может выступать, например, массив пластин (структура типа «грибная поляна»), резонансная сетка (которая была предложена для увеличения индуктивности решетки, а тем самым для снижения резонансной частоты и увеличения ширины резонансной полосы), дополняющий экран к резонансной сетке. В случае если диэлектрический слой содержит металлические перемычки, то его можно рассматривать как слой так называемой среды из проводов. Если такой слой заполняет диэлектрическую подложку, то он играет очень важную роль в подавлении волн, распространяющихся вдоль ИЭП и, что наиболее важно для нас в данной ситуации, он определяет зависимость поверхностного импеданса от угла падения.

Далее во второй главе показывается, что для расчета основных характеристик ИЭП (фазовой диаграммы коэффициента отражения и дисперсионной диаграммы поверхностных волн) достаточно уметь рассчитывать

поверхностный импеданс структуры. Действительно, коэффициент отражения от структуры можно рассчитать по следующим формулам:

$$R^{TE} = \frac{Z_{\text{пов}} \cos \theta - \eta_0}{Z_{\text{пов}} \cos \theta + \eta_0}, \quad R^{TM} = \frac{Z_{\text{пов}} - \eta_0 \cos \theta}{Z_{\text{пов}} + \eta_0 \cos \theta}, \quad (2)$$

где $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ волновой импеданс вакуума. А для построения дисперсионной диаграммы для ТЕ и ТМ волн, можно воспользоваться выражениями:

$$k_x^{TE} = k^2 - \frac{\omega^2 \mu_0^2}{(Z_{\text{пов}}^{TE})^2} = k^2 \left(1 - \frac{\eta_0^2}{(Z_{\text{пов}}^{TE})^2} \right), \quad k_x^{TM} = k^2 \left(1 - \frac{(Z_{\text{пов}}^{TM})^2}{\eta_0^2} \right). \quad (3)$$

В связи с этим получены оригинальные формулы для расчета поверхностного импеданса некоторых типов ИЭП. Как уже отмечалось, важно иметь такую простую и эффективную модель, так как в практически важных случаях, например при использовании ИЭП в качестве подложки, частота антенны должна не только быть резонансной частотой для ИЭП, освещаемых плоскими волнами, но и лежать в запрещенной зоне для поверхностных волн.

В работе рассматриваются два случая – стандартные ИЭП, содержащие диэлектрический слой с металлическими вертикальными перемычками, так называемыми «ножками», и ИЭП с диэлектрическим слоем без «ножек». Показывается, что несмотря на то, что в случае структуры типа «грибы», «ножки» помогают стабилизировать поверхностный импеданс для ТМ-волн, в случае ИЭП на основе РС, такие перемычки ухудшают стабильность $Z_{\text{пов}}$. Если они будут отсутствовать, то ИЭП на основе РС будут обладать $Z_{\text{пов}}$ практически независимым от угла падения и типа поляризации.

Кроме того, во второй главе приводится аналитическая модель для расчета «эффективной магнитной проницаемости» для ИЭП на основе петлевых резонансных элементов. Применимость определения эффективной проницаемости объемного слоя к тонкому слою была рассмотрена в работах Симовского К.Р. и др.. В структурах, изучаемых в данной работе, каждая ячейка содержит два эффективных взаимно ортогональных ПРЭ, расположенных в вертикальных плоскостях, таким образом, что верхняя поверхность рассматриваемой ИЭП представляет собой решетку металлических крестов, лежащих на диэлектрике. В данном случае ПРЭ создается двумя «ножками», проходящими через диэлектрик и соединенными на верхней поверхности диэлектрика одной из сторон креста.

“Ножки” замыкаются на заземляющую плоскость через емкость, образованную между этой плоскостью и пластиной. Решетка пластин отделена от заземляющей плоскости тонким слоем диэлектрика. Такая структура работает как решетка резонансных магнитных рассеивателей изотропных в горизонтальной плоскости (x - y). Резонанс такой решетки в основном определяется индивидуальными свойствами рассеивателей, и поэтому мало зависит от угла падения и типа поляризации падающей волны. Нахождение эффективной относительной проницаемости μ решетки параллельных ПРЭ эквивалентно нахождению связи между локальным полем $H^{\text{лок}}$ в центре произвольно выделенной петли и усредненным магнитным полем в той же точке $\langle H_y \rangle$. Так как в нашем случае каждый ПРЭ занимает практически всю ячейку структуры, то магнитостатическое взаимодействие соседних ПРЭ не может быть описано в терминах точечных магнитных диполей. Поэтому хорошо известная формула Лоренца-Лоренца-Клаузиса-Мозотти, связывающая $\langle H_y \rangle$ с $H_y^{\text{лок}}$, должна быть изменена для нашего случая. В работе получается аналог соотношения Клаузиса-Мозотти в виде:

$$\langle H_y \rangle = H_y^{\text{лок}} - \left(\frac{VL}{\mu_0^2 S^2} \right) M. \quad (4)$$

Учитывая, что поперечная проницаемость μ объемной одноосевой среды определяется через поперечное намагничивание одной ячейки структуры $M = m/V$ (где V - это объем ячейки $V = D^2 P$) как $\mu = 1 + \frac{M}{\mu_0 \langle H \rangle}$, которое может быть переписано в виде:

$$\mu = 1 + \frac{a_m H_y^{\text{лок}}}{\mu_0 V \langle H_y \rangle}, \quad (5)$$

получаем результирующее выражение для «эффективной магнитной проницаемости»:

$$\mu = 1 + \frac{1}{\mu_0 V \operatorname{Re} \left(\frac{1}{a_m} \right) - \frac{LV}{\mu_0 S^2}}. \quad (6)$$

В этом выражении также учтено, что решетка ПРЭ регулярна, и согласно принципу Мандельштама-Планка радиационные потери отсутствуют. Соответственно,

мнимая часть $1/a_m$ (пропорциональная сопротивлению излучения), должна сокращаться в выражениях для материальных параметров структуры.

В третьей главе подробно описываются основные результаты теории и моделирования, полученные при помощи программного пакета Ansoft HFSS. Показывается, что представленная аналитическая модель с хорошей точностью позволяет рассчитывать основные характеристики стандартных типов ИЭП - фазовую и дисперсионную диаграммы.

В параграфе 3.1 приводятся фазовые кривые для шести различных ИЭП для различных углов падения ($\theta \leq 60^\circ$) и двух типов поляризации. Также здесь проанализирована зависимость поверхностного импеданса структур от угла падения и типа поляризации падающей волны. Показано, что все рассмотренные ИЭП являются высоко-импедансными поверхностями, так как для углов $\theta \leq 60^\circ$ резонансные значения поверхностного импеданса остаются существенно больше $\eta = 120\pi$. Примеры вычисления поверхностного импеданса ИЭП приведены на рис.3.

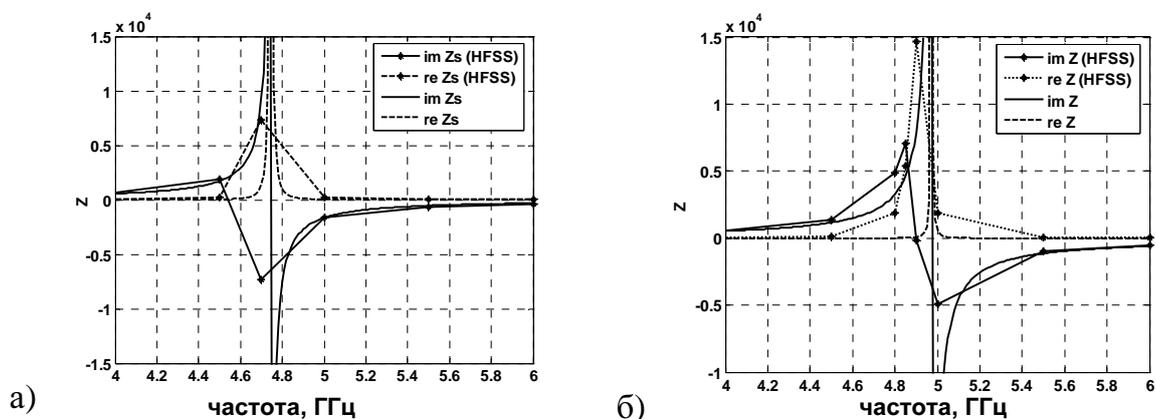


Рис.3. Примеры расчета поверхностного импеданса при помощи теории и численного моделирования в HFSS для различных типов ИЭП. Графики приведены для нормального падения плоской волны. а) ИЭП на основе РС из спиралевидных элементов, расположенной на металлизированном снизу диэлектрическом слое, не содержащем «ножки». б) ИЭП на основе решетки пластин, расположенных на металлизированном снизу диэлектрическом слое, не содержащем «ножки».

На основе результатов моделирования можно заключить, что наиболее стабильным по углу и типу поляризации падающей волны резонансом обладает ИЭП на основе РС, состоящих из спиралевидных элементов (рис.4), расположенных на металлизированном диэлектрическом слое, не содержащем «ножки». На рис.5 приведены фазовые диаграммы (результаты теории и точного численного моделирования) для этого случая. Самым же нестабильным по углу резонансом оказался резонанс ИЭП на основе дополняющего к РС экрана.



Рис. 4. РС, состоящая из спиралевидных элементов.

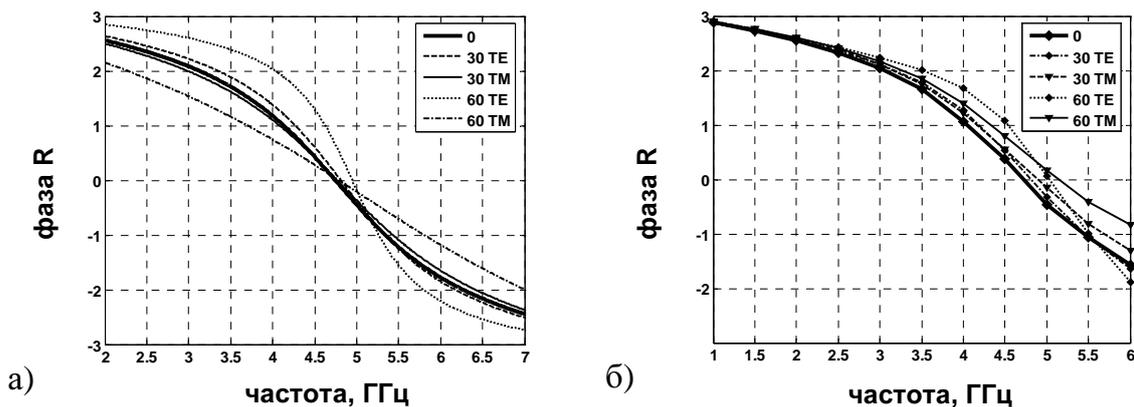


Рис. 5. Фазовая диаграмма для ИЭП на основе РС с петлями, расположенной на диэлектрическом слое без «ножек» для углов падения $0...60^\circ$ для TE и TM типа поляризации; а) теория; б) результаты моделирования HFSS

В параграфе 3.2 на примере ИЭП, состоящих из резонансной сетки или дополняющего экрана к резонансной сетке, расположенных на металлизированном снизу диэлектрическом слое, показывается возможность расчета дисперсионных кривых для поверхностных волн на таких структурах с использованием изложенной аналитической модели. В этом случае теоретический расчет также дает результат с достаточной точностью. Рассмотрены запрещенные зоны, появляющиеся в дисперсионных диаграммах данных структур.

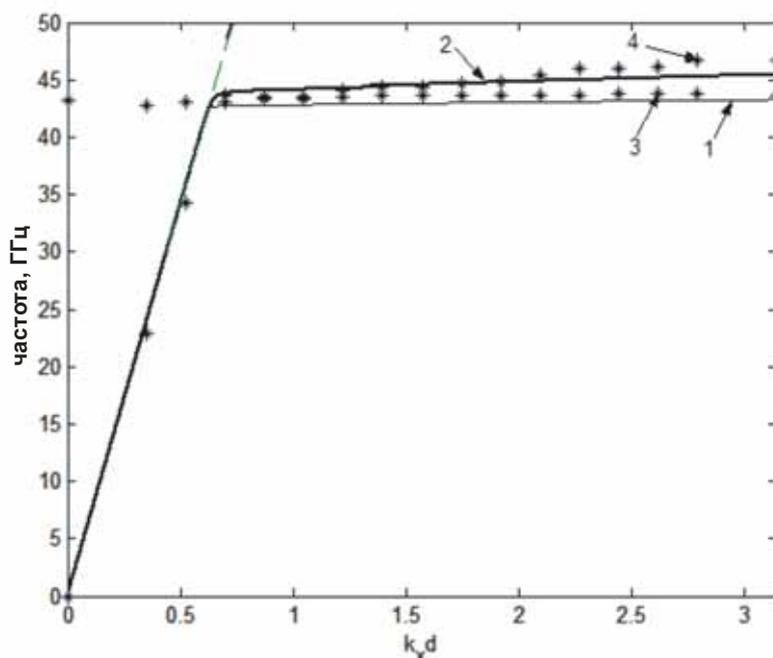


Рис. 6. Дисперсионная диаграмма поверхностных волн для ИЭП на основе сетки Иерусалимских крестов. Результаты аналитического моделирования: 1 – *TE*-волна, 2 – *TM*-волна. Результаты HFSS: 3 – *TE*-волна, 4 – *TM*-волна.

В параграфе 3.3 приводятся аналитические и численные результаты для ИЭП на основе петлевых резонансных элементов, которые показывают, что такая структура может обладать широкой резонансной полосой магнитных свойств и, к тому же, может рассматриваться как искусственный магнитный материал в диапазоне частот 2 - 4 ГГц при размерах ячейки структуры порядка 3 – 4 мм.

В приложении рассмотрены основные принципы работы программного пакета Ansoft HFSS и этапы создания модели в нем.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование свойств и выполнено моделирование характеристик искусственных электромагнитных поверхностей (фазовые диаграммы и поверхностные диаграммы).
2. Установлено, что для изучения основных характеристик ИЭП достаточно уметь рассчитывать поверхностный импеданс таких структур.
3. Получены аналитические выражения для расчета поверхностного импеданса некоторых типов ИЭП.
4. В результате исследования характеристик рассматриваемых типов ИЭП показано, что приведенная аналитическая модель позволяет с хорошей точностью вычислять основные характеристики стандартных ИЭП, а именно: диаграмму фазы коэффициента отражения и дисперсионную диаграмму поверхностных волн, т.е. поверхностный импеданс структур можно рассчитывать по тем же формулам, даже в случае комплексных углов падения волны.
5. В результате исследования первой характеристики (фазовой диаграммы) рассматриваемых типов ИЭП выявлено, что наиболее независимым от угла падения и типа поляризации падающей волны резонансом обладает ИЭП, состоящая из РС, расположенной на диэлектрическом слое, не содержащим «ножки».
6. Показано на основе полученных результатов, что наиболее зависимым от угла падения и типа поляризации падающей волны резонансом обладает ИЭП, состоящая из дополняющего экрана к РС, расположенной на диэлектрическом слое, не содержащим «ножки».
7. Проведен анализ свойств ИЭП на основе ПРЭ.
8. Установлено, что такой тип ИЭП может быть адекватно описан в терминах «эффективной магнитной проницаемости» и рассматриваться как решетка резонансных магнитных рассеивателей изотропных в горизонтальной плоскости (x - y).

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. C.R Simovski, P.de Maggt, I.V. Melchakova. High-impedance surfaces with angular and polarization stability // Proc. 27-th European Space Agency Antenna Workshop On Innovative Periodic Antennas, Santiago de Compostela, Spain, March 9-11, 2004, P. 178-185.
2. C.R. Simovski, T. Rouiller, I.V. Melchakova. Full-angle magnetic conductors and their application in coplanar isolators // 34th European Microwave Conference. Amsterdam. the Netherlands. 11-15 Oct. 2004. vol.3. pp.1349-1351.
3. Simovski, C.R. High-impedance surfaces having stable resonance with respect to polarization and incidence angle / C.R Simovski, P.de Maggt, I.V. Melchakova. // IEEE Trans. AP. – 2005. - Vol.53, № 3. - P.908-914.
4. Симовский, К.Р. Аналитическое и численное исследование свойств поверхности с высоким импедансом / К.Р. Симовский, А.А. Сочава, И.В. Мельчакова // Радиотехника. – 2007. - № 12. - С.50-55.
5. Симовский, К.Р. Поверхность с высоким импедансом и стабильным низкочастотным резонансом / К.Р. Симовский, А.А. Сочава, И.В. Мельчакова // Радиотехника и Электроника. – 2008. - Т.53, № 5. - С.527-536.
6. Мельчакова, И.В. Простая эффективная аналитическая модель искусственных импедансных поверхностей на основе резонансных микрополосковых сеток / И.В. Мельчакова, К.Р. Симовский // Радиотехника и Электроника. – 2008. - Т.53, № 8. - С.925-933.