

На правах рукописи

Кондратьев Михаил Сергеевич

**Отражение и прохождение плоских
электромагнитных волн в регулярных
структурах бианизотропных рассеивающих
центров**

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2003

Работа выполнена на кафедре физики Санкт–Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Симовский К.Р.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Акимов В.П.

кандидат физико-математических наук Смирнова А.А.

Ведущая организация: Военный университет связи

Защита состоится "19 "июня 2003 г. в _____ на заседании Диссертационного Совета Д 212.229.01 при Санкт–Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт–Петербург, ул. Политехническая, д. 29, ауд. 470 (2-ой корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт–Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2003 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.01

доктор физико-математических наук, профессор _____

Водоватов И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена исследованию отражения и прохождения плоских электромагнитных волн в регулярных структурах (решетках) рассеивателей сложной геометрии. В работе исследуются несколько типов решеток — одномерные решетки (цепочки) частиц, двумерные бесконечные планарные решетки, расположенные в свободном пространстве и над диэлектрической подложкой. В качестве рассеивателей сложной геометрии (частиц, имеющих сложную пространственную геометрию) в данной работе исследуются бианизотропные частицы (например, омега и киральные частицы, см. рис. 1).

Выбор темы обусловлен интересом к свойствам регулярных структур (композитов), состоящих из бианизотропных рассеивателей, и возможностью их применения в прикладных областях (малоотражающие покрытия, преобразователи поляризации, частотноселективные поверхности и т.д.)

Задача об отражении плоских электромагнитных волн от регулярных двумерных структур в свободном пространстве и над диэлектрической подложкой хорошо известна, и этой теме посвящено большое количество исследований и работ. Однако, в большинстве этих работ рассматриваются лишь простейшие виды рассеивателей — линейные вибраторы, замкнутые кольца, цилиндры, и задача решается в рамках классической теории. Если же исследуются рассеиватели более сложной формы, авторы вынуждены прибегать к сложным численным схемам. В данной работе построена аналитическая модель возбуждения и отражения плоских электромагнитных волн от регулярных бесконечных (одномерных и двумерных) структур рассеивателей сложной геометрии в свободном пространстве и над подложкой.

Цели работы.

Целью настоящей диссертационной работы является построение законченной аналитической модели отражения от регулярных структур рассеивателей сложной геометрии с последовательным учетом переизлучения поля частицами в дипольном приближении в свободном пространстве и над диэлектрической подложкой.

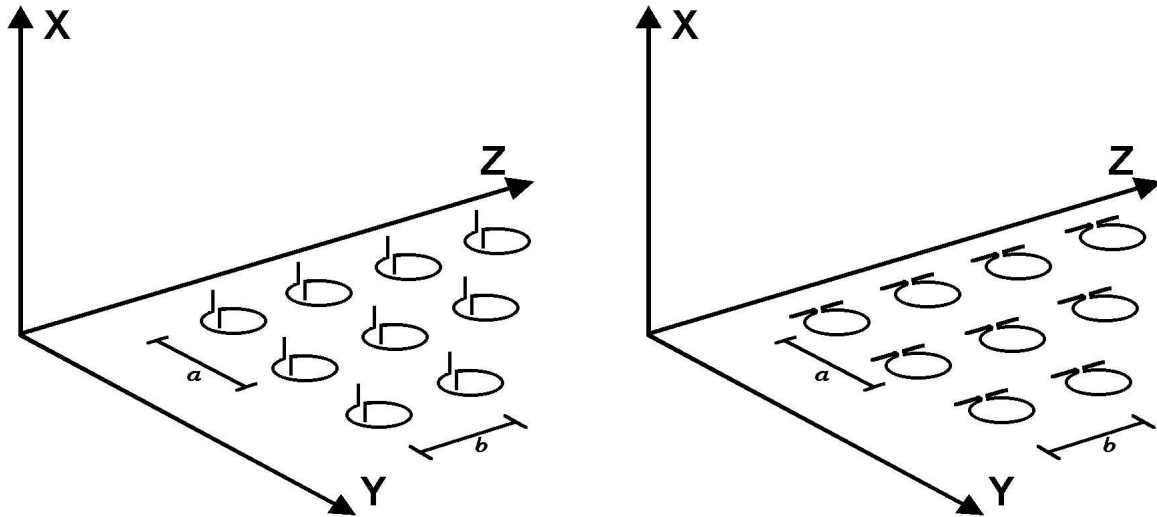


Рис. 1: Киральные и омега-частицы

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Расчет и анализ поляризуемостей бианизотропных частиц, используя антенную модель и пакет моделирования Ensemble SV,
- Построена модель взаимодействия и возбуждения одномерных структур (цепочек) рассеивателей сложной геометрии и проведен численный анализ полученной модели,
- Построена модель взаимодействия и возбуждения двумерных планарных структур (решеток) рассеивателей сложной геометрии в свободном пространстве,
- Построена и исследована модель отражения и прохождения плоских электромагнитных волн в планарных структурах (решетках) рассеивателей сложной геометрии в свободном пространстве,
- Построена модель взаимодействия и возбуждения двумерных планарных структур (решеток) рассеивателей сложной геометрии над диэлектрической подложкой,
- Решена задача нахождения поля взаимодействия частиц решетки и диэлектрической подложки (поля самодействия),

- Предложен метод ускорения сходимости рядов, описывающих поля взаимодействия частиц решетки над диэлектрической подложкой,
- Построена и исследована модель отражения плоских электромагнитных волн в планарных структурах (решетках) рассеивателей сложной геометрии над диэлектрической подложкой с учетом взаимодействия частиц решетки и диэлектрической подложки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Построена аналитическая модель взаимодействия и возбуждения одномерных структур (цепочек) рассеивателей сложной геометрии и проведен численный анализ полученной модели,
2. Построена аналитическая модель возбуждения двумерных планарных структур (решеток) рассеивателей сложной геометрии в свободном пространстве,
3. Построена аналитическая модель отражения и прохождения плоских электромагнитных волн в планарных структурах (решетках) рассеивателей сложной геометрии в свободном пространстве,
4. Построена аналитическая модель взаимодействия в двумерных планарных структурах (решетках) рассеивателей сложной геометрии над диэлектрической подложкой,
5. Аналитически решена задача нахождения поля взаимодействия частиц решетки и диэлектрической подложки,
6. Построена аналитическая модель возбуждения двумерных планарных структур (решеток) рассеивателей сложной геометрии над диэлектрической подложкой,
7. Построена аналитическая модель отражения плоских электромагнитных волн в планарных структурах (решетках) рассеивателей сложной геометрии над диэлектрической подложкой с учетом взаимодействия частиц решетки и диэлектрической подложки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Построенная аналитическая модель электромагнитного взаимодействия и возбуждения плоской электромагнитной волной линейных цепочек проводящих бианизотропных рассеивателей позволяет в явном виде получить аналитические выражения для компонент диад взаимодействия и возбуждения.
2. Построенная аналитическая модель электромагнитного взаимодействия, а также отражения и прохождения плоских электромагнитных волн в двумерных планарных структурах бианизотропных рассеивателей в свободном пространстве позволяет в аналитическом виде получить выражения для компонент диад взаимодействия, возбуждения, отражения и прохождения.
3. Построенная аналитическая модель электромагнитного взаимодействия и возбуждения плоской электромагнитной волной бианизотропных рассеивателей над диэлектрической подложкой позволяет в аналитическом виде получить выражения для компонент диад взаимодействия, возбуждения и отражения.
4. Построенная модель позволяет провести анализ радиопоглощающих свойств бианизотропных решеток на диэлектрической подложке, который показывает возможность получения радиопоглощающего композита при толщине слоя поглощающего диэлектрика порядка 1 мм и толщине всей структуры порядка 5–6 мм.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- Построенная аналитическая модель позволяет с высокой точностью и скоростью производить численный анализ исследуемых структур,
- Построенная модель позволяет провести анализ радиопоглощающих свойств бианизотропных решеток на диэлектрической подложке, который показывает возможность получения радиопоглощающего композита.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на:

1. SPIE 4th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, 1997,
2. 6th International Conference on Electromagnetics of Complex Media – Bianisotropics'97, Glasgow, 1997,
3. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 97), Electromagnetic properties of materials, Torino, 1997,
4. 7th International Conference on Electromagnetics of Complex Media – Bianisotropics'98, Braunschweig, 1998,
5. 5th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, 1998,
6. Day on Diffraction Millennium Workshop, Saint–Petersburg, Russia, 2000,
7. IEEE APS International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Salt Lake City, 2000,
8. 8th International Conference on Complex Media – Bianisotropics–2000, Lisbon, 2000,
9. Первая Всероссийская Научная Конференция Студентов–радиофизиков, Санкт–Петербург, 1997,
10. Вторая Всероссийская Научная Конференция Студентов–радиофизиков, Санкт–Петербург, 1998,
11. Российская научно–практическая конференция ОПТИКА–ФЦП "Интеграция", Санкт–Петербург, 1999,
12. Международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика–99”, Санкт–Петербург, 1999,

13. Третья Всероссийская Научная Конференция Студентов–радиофизиков, Санкт–Петербург, 1999,
14. Вторая Международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика–2001”, Санкт–Петербург, 2001.

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в статьях и научных работах (всего 19 публикаций).

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из пяти глав, введения, заключения и списка литературы. Работа содержит 167 страниц, 88 рисунков; список использованных источников содержит 90 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен обзор литературы в области бианизотропных сред и композитов. Рассмотрены основные результаты и соотношения, свойства биизотропных и бианизотропных сред, распространение волн в бианизотропных средах. Особое внимание уделено микроскопическим моделям, используемым при исследовании бианизотропных сред (Максвелла Гарнетта, Брюггемана), т.к. именно микроскопическая модель используется в данной работе.

Вторая глава посвящена исследованию рассеивателей сложной геометрии (бианизотропных частиц). В данной работе используется дипольная модель бианизотропной частицы, для расчета диад поляризуемости (характеризующих отклик дипольных моментов частицы на возбуждающее электромагнитное поле) используется антенная модель, предложенная группой С.А.Третьякова.

Возбуждение частиц в работе рассматривается в рамках классической дипольной модели и описывается при помощи двух векторов — электрического и магнитного моментов. Рассматриваемые виды частицы характеризуются тем, что электрический дипольный момент, описывающий частицу, зависит не только от электрического, но и от магнитного поля, и наоборот, магнитный момент зависит и от магнитного, и от электрического полей (так называемые бианизотропные частицы). Это свойство частиц является следствием магнитоэлектрического взаимодействия, в результате которого электрический момент частицы \mathbf{p} пропорционален не только локальному электрическому полю \mathbf{E} , но и локальному значению ротора электрического поля, т.е. магнитному полю. Согласно принципу взаимности аналогичное утверждение справедливо и для магнитного момента \mathbf{m} . Тем самым электрический и магнитный моменты частицы зависят от локальных значений электрического и магнитного полей. Такие частицы называются бианизотропными (БА) частицами.

Таким образом, БА частица обладает четырьмя поляризуемостями, связывающими наведенные в частице электрический и магнитный дипольные моменты со значениями локальных электрического и магнитного полей: электрической, магнитной, электромагнитной и магнитоэлектрической. Для реальных частиц все эти поляризуемости являются диадами (тензорами 2 ранга):

$$\begin{cases} \mathbf{p} = \bar{a}_{ee}\mathbf{E} + \bar{a}_{em}\mathbf{H} \\ \mathbf{m} = \bar{a}_{me}\mathbf{E} + \bar{a}_{mm}\mathbf{H} \end{cases} \quad (1)$$

Рассеиватели, описываемые формулами (1) называются бианизотропными частицами, а диады $\bar{a}_{ee}, \bar{a}_{em}, \bar{a}_{me}, \bar{a}_{mm}$ — диадами поляризуемости (polarizability dyadics). Расчет диад поляризуемости уединенной частицы выполнен в главе 2 для случая металлических (проволочных) частиц в диапазоне СВЧ.

В данной работе основное внимание уделено бианизотропным частицам, как наиболее общему и интересному случаю рассеивателей сложной формы. Однако, далее также рассмотрены модельные задачи для решеток рассеивателей не являющихся бианизотропными, например, решеток

линейных вибраторов (диполей) и С-частиц.

Можно подобрать размеры частицы–рассеивателя таким образом, чтобы оставаясь электрически малой, т.е. представляя из себя пару диполей \mathbf{p} и \mathbf{m} , частица становится резонансной. Условие резонанса выполнено, если полная длина проволочки, из которой выполнена частица почти равна удвоенной длине волны в среде. При этом частица, благодаря своим электрической и магнитной частям, представляет из себя резонансный осциллятор, более или менее эффективно захватывающий энергию волны и преобразующий ее в собственные колебания. Частицу при этом можно рассматривать как колебательный контур, с джоулевыми и радиационными потерями. Среди известных бианизотропных частиц весьма эффективно процесс преобразования энергии электромагнитной волны в энергию колебаний тока в частице происходит в киральных и омега-частицах. В итоге, с учетом потерь в металле и диэлектрике, это преобразование приводит к затуханию волны в среде и ее поглощению. В соответствующих композитах, при определенных концентрациях включений можно достичь очень высокого поглощения волны, и это при том, что волна хорошо проникает в среду, ибо рассеиватели утоплены в диэлектрик. Именно благодаря такой возможности свойства магнитоэлектрических сред интенсивно исследуются применительно к синтезу антирадарных покрытий (современные стелс-технологии).

Слой бианизотропного композита можно использовать и для создания преобразователя поляризации, ибо при магнитоэлектрическом взаимодействии часто возникает эффект преобразования падающей линейно поляризованной волны в две преломленные волны с круговой или эллиптической поляризацией и разными характеристиками. Этот эффект может быть не менее значительным, чем в магнитоактивных гиротропных средах, где он также наблюдается. Таким образом без использования намагниченных ферритов можно синтезировать преобразователи поляризации с нужными частотными свойствами (они применяются в антенно–фидерной технике СВЧ, в том числе в космических системах связи и передачи информации).

Из изложенного выше ясно, насколько важен и фундаментален вопрос

о возбуждении регулярных (как плоских, так и многослойных) структур рассеивателей сложной геометрии плоской электромагнитной волной для прикладных задач. Помимо задачи о возбуждении отдельных частиц, интересен вопрос о влиянии переизлучения бианизотропных частиц на свойства системы в целом. Существующие теории локального поля Максвелла Гарнетта (Клаузиуса–Мосотти), Брауна, Брюггемана, во-первых, заведомо справедливы лишь для достаточно разряженных композитов, во-вторых, игнорируют своеобразную форму бианизотропных включений, в-третьих, не учитывают пространственных резонансов решетки. Таким образом требуется другой — решеточный — подход к решению поставленной задачи. Именно такой подход применен в данной работе.

В данной главе также проведено численное исследование данной модели и сравнение с пакетом численного моделирования Ensemble SV.

Третья глава посвящена исследованию двумерных регулярных структур в свободном пространстве. Рассмотрена задача о взаимовлиянии частиц в двумерном массиве — плоской дифракционной решетке с прямоугольными ячейками размером $a \times b$ в свободном (однородном) пространстве. Геометрия задачи для киральных и омега-частиц представлена на рис. 1. Ввиду бианизотропии решетку таких рассеивателей нельзя описать в стандартных терминах фазированных дипольных решеток. Для решения задачи, в рамках гипотезы Релея о связи фаз дипольных моментов в регулярной плоской структуре при падении плоской электромагнитной волны, строится аналитическая модель электромагнитного взаимодействия частиц в составе регулярных бесконечных структур, возбуждаемых плоской электромагнитной волной. Для построения этой модели используется аппарат диадной (тензорной) алгебры. Локальные магнитное и электрическое поля, действующие на данную частицу (так называемую нулевую частицу), являются суммой двух составляющих: поля падающей волны и суммарного поля всех частиц решетки, кроме нулевой. Первоначально решается задача нахождения суммарных полей всех частиц решетки (исключая нулевую), и нахождения связи этих полей с дипольными магнитным и электрическим моментами нулевой частицы. Эта связь описывается так называемы-

ми диадами взаимодействия. В работе приведены как аппроксимационные (в интегральном приближении) аналитические формулы для диад взаимодействия, так и точные (в виде быстросходящихся рядов). Далее в явном аналитическом виде находится связь электрических и магнитных дипольных моментов частиц с падающей электромагнитной волной, которая описывается диадами возбуждения. Затем строится аналитическая модель отражения плоских электромагнитных волн от исследуемых типов структур. Таким образом, в этой главе решена задача нахождения коэффициентов отражения и прохождения для плоских электромагнитных волн в регулярных планарных структурах рассеивателей сложной геометрии в свободном пространстве. Численный расчет явно выявил важность исследования проблемы взаимодействия в подобных структурах.

В четвертой главе исследуются одномерные регулярные структуры (цепочки) бианизотропных частиц, которые являются простейшим видом исследуемых регулярных структур. Для структур данного типа удалось получить замкнутые аналитические выражения для компонент диад взаимодействия и возбуждения. Представлены результаты численного исследования и моделирования структур.

В пятой главе исследуются планарные структуры рассеивателей над диэлектрической подложкой. Решается задача об отражении плоской электромагнитной волны от планарной двумерной бесконечной решетки рассеивателей, расположенной над подложкой в виде диэлектрического слоя над полупространством проводника (металла). Решетка расположена столь близко к подложке, что становятся существенны эффекты взаимного влияния частиц решетки через подложку. Данная задача является более интересной и близкой к прикладным задачам, в отличие от задачи о решетке, находящейся в свободном (или бесконечном однородном) пространстве, получить которую экспериментально сложно. Решетку же, расположенную на подложке или на небольшой высоте изготовить значительно проще. Для образования зазора можно использовать специальные материалы с параметрами близкими к параметрам свободного пространства в интересующем нас диапазоне частот (например, пенопласт).

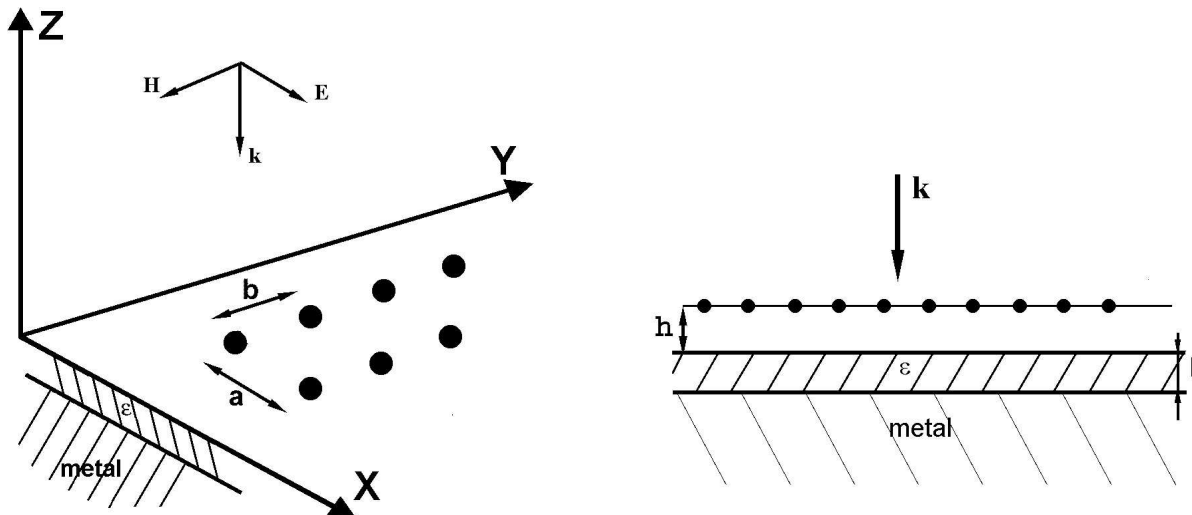


Рис. 2: Решетка над подложкой

Задача решается в дипольном приближении для случая нормального падения волны.

При решении задачи о решетке над подложкой (геометрию задачи см. рис. 2), применялись идеи аналогичные примененным для решения задачи о решетке в свободном пространстве. Сложность этой задачи, по сравнению с задачей о решетке в свободном пространстве, заключается в необходимости учета влияния частиц решетки на подложку и обратно подложки на частицы решетки. Также отдельной сложной задачей является нахождение поля частицы в присутствии подложки.

Первоначально решалась задача о возбуждении решетки плоской электромагнитной волной. Локальные магнитное и электрическое поля, действующие на данную частицу (так называемую нулевую частицу), являются суммой трех составляющих: поля падающей волны, суммарного поля всех частиц решетки, кроме нулевой, и поля поляризованной подложки. Поле подложки в свою очередь, можно разделить на поле отраженной волны (отраженной от подложки в отсутствие частиц) и поле поляризации подложки, созданное решеткой частиц. Сначала решается задача о поле взаимодействия частиц решетки в свободном пространстве. Эта связь описывается так называемыми диадами взаимодействия. Далее находятся выражения для поля поляризованной подложки. После этого, в явном ана-

литическом виде находится связь электрических и магнитных дипольных моментов частиц с падающей электромагнитной волной, которая описывается диадами возбуждения. Затем строится аналитическая модель отражения плоских электромагнитных волн от исследуемых типов структур.

Также в этой главе приведены результаты численного моделирования различных типов решеток и их сравнения с результатами моделирования другими методами. Построенная модель позволяет провести анализ радиопоглощающих свойств бианизотропных решеток на диэлектрической подложке, который показывает возможность получения радиопоглощающего композита при толщине слоя поглощающего диэлектрика порядка 1 мм и толщине всей структуры порядка 5–6 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты исследования отражения плоских электромагнитных волн от регулярных структур рассеивателей сложной геометрии с последовательным учетом переизлучения поля частицами в дипольном приближении в свободном пространстве и над диэлектрической подложкой.

Проведен анализ антенной модели бианизотропной частицы (численный расчет и сравнение с результатами моделирования в пакете Ensemble SV), который позволил проанализировать диапазон применимости данной модели.

Представлены результаты исследования линейных структур (цепочек) бианизотропных частиц, для которых построена полностью аналитическая модель взаимодействия и возбуждения. Проведены исследования и анализ структур данного типа (цепочек киральных и омега-частиц).

Построена и исследована модель взаимодействия и возбуждения плоской электромагнитной волной двумерных планарных решеток в свободном пространстве. Построенная модель возбуждения позволила вычислить коэффициенты отражения для таких структур, и провести численные исследования и анализ (для решеток омега-частиц и С-частиц).

В работе решена задача об отражении плоской электромагнитной волны от планарной двумерной бесконечной решетки рассеивателей, расположенной над подложкой в виде диэлектрического слоя над полупространством проводника (металла). При этом решена задача о точном учете взаимодействия решетки и подложки. Построенная модель позволяет провести аналитический и численный анализ отражающих свойств бианизотропных решеток над диэлектрической подложкой, который показывает возможность получения малоотражающего композита при определенных параметрах структуры.

Таким образом, в работе построены аналитические модели возбуждения, взаимодействия, отражения и самодействия в таких структурах (линейных структурах (цепочках), двумерных планарных решетках в свободном пространстве и над диэлектрической подложкой), исследованы наиболее интересных виды рассеивателей сложной геометрии (омега-частиц, киральных частиц, С-частиц).

В рамках данной работы написан пакет программ (на языке Matlab), позволяющий проводить численное моделирование и расчет исследуемых структур по построенным моделям.

Работа имеет практическое значение применительно к проблемам синтеза тонкослойных преобразователей поляризации, а также антирадарных и просветляющих покрытий.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Белов П.А., Симовский К.Р., Кондратьев М.С., Булыгин Д.О. Возбуждение дифракционной решетки из бианизотропных частиц плоской электромагнитной волной // Известия вузов, Приборостроение, 1998, Т. 41, No. 3. - С. 21-32.
2. Кондратьев М.С. Отражение электромагнитных волн и электромагнитное взаимодействие в системах "дифракционная решетка - непрозрачные среды" / Проблемы когерентной и нелинейной оптики, сборник статей под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова, Санкт-Петербург,

2000. - стр. 220-235.

3. Кондратьев М.С. Аналитическое и численное исследование регулярных структур бианизотропных частиц // Вестник Молодых Ученых, серия "Физические науки", №1, 2000. - сс. 41-57.
4. Simovski C.R., Kondratjev M.S., Belov P.A., Tretyakov S.A. Excitation dyadics for the grids of chiral and omega particles // Mathematics and Control in Smart Structures, Proceedings of SPIE 4th Annual Symposium on Smart Materials, San Diego, 4-7 March, 1997. - pp. 692-703.
5. Belov P.A., Simovski C.R., Kondratjev M.S. Problem of the local field for plane grids with bi-anisotropic particles // Mathematics and Control in Smart Structures, Proceedings of SPIE 4th Annual Symposium on Smart Materials, San Diego, 4-7 March, 1997. - pp. 680-691.
6. Simovski C.R., Belov P.A., Kondratjev M.S., Tretyakov S.A. Diffraction by a planar array of omega particles // Proceedings of International Conference on complex electromagnetic media, chiral and bianisotropic composites - Bianisotropics'97, Glasgow, 1997. - pp. 293-296.
7. Simovski C.R., Kondratjev M.S., Belov P.A., Tretyakov S.A. Electromagnetic interaction of chiral and omega particles in linear array // Proceedings of International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 97), Torino, 1997. - pp. 389-392.
8. Belov P.A., Simovski C.R., Kondratjev M.S. Analytical study of electromagnetic interactions in two-dimensional bianisotropic arrays // Proceedings of 7th International Conference on Complex Media, Bianisotropics'98, Braunschweig, 1998. - pp. 289-292.
9. Simovski C.R., Belov P.A., Kondratjev M.S. Electromagnetic interaction of chiral particles in three dimensional arrays // Journal of Electromagnetic Waves and Applications (JEWA), Vol. 13, 1999. - pp. 189-203.

10. Simovski C.R., Kondratjev M.S., Belov P.A., Tretyakov S.A. Interaction effects in two-dimensional bianisotropic arrays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 47, No. 9, 1999. - pp. 1429-1439.
11. Kondratjev M.S., Simovski C.R., Belov P.A. Reflection and transmission of plane waves in bianisotropic planar grids // Mathematics and Control in Smart Structures, Proceedings of SPIE 5th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, 2-5 March, 1998. - pp. 669-678.
12. Belov P.A., Simovski C.R., Kondratjev M.S. Analytical-numerical study of electromagnetic interaction in two-dimensional bianisotropic arrays // Mathematics and Control in Smart Structures, Proceedings of SPIE 5th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, 2-5 March, 1998. - pp. 679-690.
13. Simovski C.R., Belov P.A., Kondratjev M.S. Excitation of multilayered grids of bianisotropic particles by plane wave // Mathematics and Control in Smart Structures, Proceedings of SPIE 5th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, 2-5 March, 1998. - pp. 691-698.
14. Simovski C.R., Kondratjev M.S., He S. Array of C-shaped wire elements for the reduction of reflection from a conducting plane // Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 25, No.5, 2000. - pp. 302-307.
15. He S., Kondratjev M.S., Simovski C.R. Array of C-shaped wire elements for thickness reduction of Dallenbach low-reflecting shields // Journal of Electromagnetic Waves and Applications (JEWA), Vol. 14, No.10, 2000. - pp. 1463-1479.
16. Kondratjev M.S., Simovski C.R., Belov P.A. Reflection of plane waves from the array of complex-shape scatterers substrated by a dielectric shield // Proceedings of IEEE APS International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Salt Lake City, Vol. 3, 2000. - pp. 1582-1585.

17. Belov P.A., Kondratjev M.S. On the relations of microscopic and averaged material parameters in composite media // Proceedings of IEEE APS International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Salt Lake City, Vol. 1, 2000. - pp. 364-367.
18. Kondratjev M.S., Belov P.A. Analytical and numerical study of reflection of plane waves from two-dimensional bianisotropic array substrated by a dielectric shield // Proceedings of 8th International Conference on Complex Media - Bianisotropics-2000, Lisbon, 2000. - pp.333-336.
19. Kondratjev M.S., Simovski C.R. Analytical Model of Reflection from Two-dimensional Array of Complex-Shaped Scatterers Substrated by a Dielectric Slab // Proceedings of 24th ESTEC Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas: Photonic Bandgap, Fractal and Frequency Selective Structures, Noordwijk, The Netherlands, 30 May - 1 June 2001. - pp. 51-56.