Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации (ARMIMP-2016)

ТРУДЫ

Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова

Серия: АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Выпуск: IX

РНТОРЭС
ИМ. А.С. ПОПОВА

Москва–Суздаль, 2016

К 80–летию Владислава Ивановича Пустовойта

15 ноября 2016 г. исполняется **80 лет** председателю Международной конференции «**Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации**», крупному ученому в области физики твердого тела, акустоэлектроники и акустооптики, лауреату Государственных премий СССР и РФ, академику РАН, доктору физико-математических наук, профессору

Владиславу Ивановичу Пустовойту

УДК [621.396.96+528.8](082)
ББК 32.844+23.12
А44

Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 9-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Суздаль. Россия. 2016.

Рецензенты:
проф. Боголюбов А.Н., проф. Волосюк В.К., проф. Кравченко В.Ф.,
проф. Морозов А.Н., д.ф.-м.н. Пожар В.Э.

9-я Международная конференция
АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

2 – 5 октября 2016, Суздаль, Россия

9 th International Conference
ACOUSTOOPTIC AND RADAR METHODS FOR INFORMATION MEASUREMENTS AND PROCESSING

October 2 – 5, 2016, Suzdal, Russia

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

PROCEEDINGS

Авторы несут юридическую ответственность за содержание материалов, представленных в докладах.

ISBN 978-5-905278-28-0

О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АППРОКСИМАНТОВ АПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

асп. Домбровская Ж.О.[1], *к.ф.-м.н., с.н.с. Рыжикова Ю.В.*[2]

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
[1]кафедра математики, [2]кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем
dombzhanna@yandex.ru

Рассмотрены методы расчета оптических характеристик аппроксимантов применительно к апериодическим дифракционным решеткам и фотонным кристаллам, в том числе, с метаслоями. Разработаны практические подходы к решению важной физической проблемы, относящейся к установлению связи между скейлингом характеристик световых полей и структурными особенностями аппроксимантов. Исследована устойчивость оптических характеристик аппроксимантов к различным способам их построения и к внесению фазонных дефектов в их структуру.

Большой интерес к объектам с фрактальной структурой объясняется, прежде всего, тем, что они гораздо лучше описывают многие природные явления по сравнению с объектами классической геометрии. Действительно, основатель фрактальной геометрии Бенуа Б. Мандельброт в своем труде «Фрактальная геометрия природы» ставит и дает ответ на основополагающий вопрос, сопровождающий разнонаправленные междисциплинарные исследования естественнонаучного и гуманитарного профиля, связанные с изучением природоподобных объектов: «Почему геометрию называют холодной и сухой? Одна из причин заключается в ее неспособности описать форму облака, горы, дерева или берега моря. Облака – это не сферы, горы – это не конусы, линии берега – это не окружности, и кора не является гладкой, и молния не распространяется по прямой... Природа демонстрирует нам не просто более высокую степень, а совсем другой уровень сложности. Число различных масштабов длин в структурах всегда бесконечно» [1].

В современных оптических исследованиях важную роль играют междисциплинарные технологии, позволяющие изучать с единых позиций объекты разной физической природы. К ним можно отнести фрактальную параметризацию. Следует отметить, что элементы с фрактальной структурой часто встречаются в различных областях научных исследований и технологий [2-3].

Одним из способов исследования апериодических структур, является подход, основанный на использовании их аппроксимантов [4]. Несмотря на значительное число публикаций [5-6], посвященных изучению характеристик апериодических структур, в том числе, построенных на основе использования одномерных моделей квазикристаллов [6], оптические свойства их аппроксимантов не изучены в полной мере. Исследование характеристик аппроксимантов делает актуальной задачу о поиске оптимальных алгоритмов расчета.

Данная работа посвящена исследованию устойчивости скейлинговых свойств аппроксимантов разной геометрической конфигурации в их оптических характеристиках. Изучение скейлинга (масштабной инвариантности) нашло применение в качестве эффективного инструмента изучения характеристик сложных пространственно-временных структур разной физической природы. В оптических исследованиях оно широко применяется для определения важных закономерностей [7-8]. Большое внимание уделяется определению скейлинговых параметров в лазерных системах при развитии динамического хаоса и распространении излучения в каналах со случайными неоднородностями [9]. Скейлинговые и тесно связанные с ними фрактальные представления успешно используются при решении классических для физической оптики задач дифракции когерентного излучения. Их решение создает физическую основу при разработке новых средств диагностики для анализа апериодических структур с фрактальными свойствами, в том числе, наноструктурированных систем с разным уровнем упорядоченности.

Ранее сообщалось [10-11] о перспективности метода диагностики, основанного на паттерном анализе свойств зондирующего излучения. Путем регистрации паттернов – отдельных элементов в характеристиках зондирующего излучения, появляется возможность идентифицировать оптические системы с определенным типом симметрии и определять степень их структурных нарушений. Однако в указанных работах не был затронут вопрос об устойчивости формы паттернов аппроксимантов к изменению способов их задания без нарушения исходного принципа симметрии самоподобия, присущего рассматриваемым системам.

Для построения аппроксимантов нужно сформировать начальную структуру на базе одного из видов апериодических числовых последовательностей $S_l = \{A, B\}$, где l – уровень генерации, A и B – составляющие элементы последовательности. Используемые последовательности определяют закон чередования элементов в первичной структуре. В многослойных системах этот закон определяет распределение слоев с высоким и низким показателем преломления. В решетчатых структурах, матрицы, построенные на базе используемой последовательности, характеризуют положение рассеивающих центров и свободных вакансий. Для примера рассмотрим задание аппроксимантов на основе использования числовых свойств последовательности Фибоначчи [6]: $S_0 = B$; $S_1 = A$; $S_2 = AB$. При переходе к более высокому структурному уровню $l > 3$ используются следующие правила:

$$A \to AB,\ B \to A\,. \tag{1}$$

На рис. 1,а в качестве примера показана многослойная система $\{A, B\}$, геометрия которой отражает суммационный принцип Фибоначчи. На границах областей системы $\{A, B\}$ расположены узлы, положение которых определяет пространственную структуру решетчатых объектов Фибоначчи. Рисунок 1b иллюстрирует распределение мощности пространственного спектра на разных частотных интервалах и разных масштабах по значениям интенсивности. На нем показана также система максимумов $abcd$, $defg$, $ghij$, $jklm$, $a_1b_1c_1d_1$, которая может рассматриваться в качестве свойственного системам Фибоначчи паттерна. Расположение максимумов внутри паттернов ad, dg, gj, jm, a_1d_1 подчиняется правилу: $dm / ad = a_1b_1 / b_1c_1 = \Phi$, где $\Phi \approx 1{,}62$ – коэффициент Золотого сечения [12].

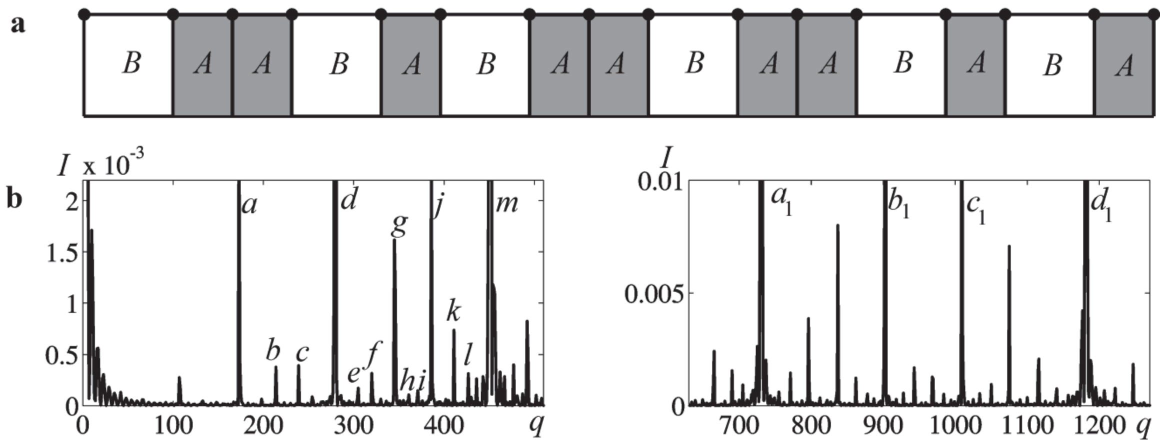

***Рис. 1.** Паттерные образования в характеристиках системы Фибоначчи (число элементов решетки 612). Фрагмент апериодической структуры (a), пространственный спектр мощности в разных масштабах и частотных интервалах (b). Выделенные паттерны на разных фрагментах спектров обозначены abcd, defg, ghij, jklm (слева) и $a_1b_1c_1d_1$ (справа). q – нормированная пространственная частота.*

В настоящей работе рассматриваются аппроксиманты апериодических структур двух типов, различающиеся способом построения. Первый тип аппроксимантов $\mathrm{A}_l^{(1)} = \{S_l\}^p$ – последовательность элементарных ячеек S_l. В роли таких ячеек могут выступать отдельные уровни генерации l используемой последовательности. Порядок аппроксиманта p характеризует период чередования элементарных ячеек. Тогда формула построения аппроксимантов Фибоначчи принимает вид

$$\mathrm{A}_0 = \left\{\underbrace{B}_{S_0}\right\}^p,\ \mathrm{A}_1 = \left\{\underbrace{A}_{S_1}\right\}^p,\ \mathrm{A}_2 = \left\{\underbrace{AB}_{S_2}\right\}^p,$$

$$\mathrm{A}_3 = \left\{\underbrace{ABA}_{S_3}\right\}^p,\ \mathrm{A}_4 = \left\{\underbrace{ABAAB}_{S_4}\right\}^p,\ \mathrm{A}_5 = \left\{\underbrace{ABAABABA}_{S_5}\right\}^p,\ldots,\mathrm{A}_{l+1} = \left\{S_l S_{l-1}\right\}^p. \tag{2}$$

Второй тип аппроксимантов одномерных структур $\tilde{\mathrm{A}}_{l'}^{(2)} = \left\{\tilde{S}_{l'}\right\}^p$ реализуется в виде последовательности элементарных ячеек $\tilde{S}_{l'}$ ($\tilde{S}_{l'} \neq S_l$). Структура $\tilde{S}_{l'}$ может варьироваться в широких пределах без изменения исходного принципа симметрии самоподобия. Здесь индекс l' – аналог l, определяющий степень сложности элементарной ячейки. В частности, ко второму типу были отнесены аппроксиманты, полученные посредством метода проецирования [13] и аппроксиманты с элементарными ячейками, отличающимися порядком чередования в них элементов A и B от их аналогов первого типа.

Аппроксиманты второго типа систем Фибоначчи можно построить на основе элементарных ячеек: $\tilde{S}_{l'}$ и $\tilde{S}_{l'}{}'$ с одинаковым числом образующих элементов A и B:

$$\tilde{S}_{l'=0,1,2,3} = \tilde{S}'_{l'=0,1,2,3} = S_{l=0,1,2,3},\ \tilde{S}_4 = \tilde{S}'_4 = (ABABA),\ \tilde{S}_5 = (BABAABAA) \text{ и } \tilde{S}'_5 = (ABAABAAB),$$

$$\tilde{S}_6 = (BABAABABAABAA) \text{ и } \tilde{S}'_6 = (ABAABABAABABA) \text{ и т.д.}$$

Здесь $\tilde{S}_{l'}$ – элементарные ячейки аппроксимантов 2-го типа, полученные методом проецирования [13], последующие элементарные ячейки $\tilde{S}_{l'}{}'$ формируются на основе применения правила (1).

Следует отметить, структурную эквивалентность оптических характеристик (по форме) аппроксимантов первого и второго типов. Поскольку самоподобные свойства многослойных систем и апериодических дифракционных решеток определяются фурье-образом их структуры [8, 14], то важное значение имеет анализ распределений пространственных частот рассматриваемых объектов

$$A_q = \sum_{j=1}^{J} P_j \omega_J^{(j-1)(q-1)}, \tag{3}$$

где $\omega_J = \exp\{-2\pi i / J\}$, $j, q = 1, 2, \ldots J$, A_q – распределение амплитуды фурье-спектров, P_j – функция пропускания, соответствующая бинарной форме построения исследуемых структур: $P_j = \{0,1\}$ (j – порядковый номер элемента) [8]. Для анализа оптических свойств диэлектрических многослойных систем применялся матричный формализм [15-16]. Результаты численного моделирования показали, что при определенном усложнении анализируемых структур за счет внесения локальных дефектов (фазонов) между элементарными ячейками аппроксимантов, коэффициент скейлинга и форма регистрируемых паттернов не претерпевает существенных изменений. При этом фазонные дефекты представлялись в виде воздушных зазоров и слоев из метаматериала, внедренных в структуру многослойных систем.

Кроме того рассматриваются фазонные дефекты на основе использования фрактальных элементов, сформированных с использованием множества Кантора, кривых Пеано разных порядков применительно к 2D фотонным кристаллам [17]. Проанализирована степень влияния вносимых структурных возмущений в исследуемые объекты на их оптические характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00386 мол_а.

Литература

1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. / М.: «Институт компьютерных исследований», 2002.
2. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации / М.: Логос, 2002.
3. Боголюбов А. Н., Петухов А. А., Шапкина Н. Е. Оптическая дифракция на фрактальных решетках // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2008. Т. 63. № 2. С. 11-14.
4. (Bogolyubov A.N., Petukhov A.A., Shapkina N.E. Optical diffraction on fractal lattices // Moscow University Physics Bulletin. 2008. V. 63. № 2. P. 87-90.)
5. Поздняков В.А. Физическое материаловедение наноструктурных материалов. Учебное пособие. / М.: МГИУ, 2007.
6. Negro, L.D. Optics of Aperiodic Structures – Fundamentals and Device Applications / CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.
7. Albuquerque, E.L., Cottam, M.G. Theory of elementary excitation in quasiperiodic structures // Phys. Rep. 2003. V. 376. P. 225-337.
8. Гридчина В.В., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Скейлинг в оптических характеристиках нанокластерных образований. // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 12. С. 1691-1694.
9. (Gridchina V.V., Korolenko P.V., Ryzhikova Y.V. Scaling in the optical characteristics of nanocluster structures // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V. 79. № 12. P. 1480-1483).
10. Korolenko P.V., Logachev P.A., Ryzhikova Yu.V. Optical properties of 1D and 2D approximants of quasicrystalline structures. // Physics of Wave Phenomena. 2015. V. 23. № 1. P. 46-51.
11. Зотов А.М., Ким Е.Г., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Моделирование апериодических структур со скейлинговыми оптическими характеристиками // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. №12. С. 10-15.
12. Короленко П.В., Логачев П.А., Мишин А.Ю., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. Квазикристаллические модели аппроксимантов 1D и 2D структур. // В сборнике трудов Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. 7-я Международная конференция “Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации” (ARMIMP-2014). 2014. С. 38-41.
13. Короленко П.В., Мишин А.Ю., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. 1D и 2D модели аппроксимантов квазикристаллических структур. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т.20. №3. С.17-23.
14. Korolenko P.V., Mishin A.Yu., Ryzhikova Yu.V. Scaling in the characteristics of aperiodic multilayer structures // Journal of Optical Technology. 2012. V. 79. № 12. P. 754-757.
15. Фаддеев М.А. Аппроксиманты одномерных квазикристаллов. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Физика твердого тела. 2001. №1. С. 44-48.

16. Korolenko, P.V., Ryzhikov, S.B., Ryzhikova, Yu.V. Pattern stability in diffraction of light from structures with self-similarity symmetry // Phys. Wave Phenom. 2013. Vol. 21(4). P. 256-260.
17. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / М.: Наука, 1970.
18. Путилин Э.С. Оптические покрытия: Учебное пособие. / СПб.: СПбГУИТМО. 2010.
19. Dombrovskaya Z.O. Research of spectral characteristics for photonic crystals with fractal defects // International Symposium "Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves" (MSMW-2013). 2013. P. 611-613.

CALCULATION METHODS OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF APERIODIC STRUCTURES APPROXIMANTS

Zh.O. Dombrovskaya[2] and Yu.V. Ryzhikova[1]

[1]Department of Optics, Spectroscopy and Nanosystems physics, [2]Department of Mathematics,
Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University.
dombzhanna@yandex.ru

Calculation methods of optical characteristics of approximants with regard to aperiodic diffraction gratings and photonic crystals, including metamaterial layers, are considered. Practical approaches for the solution of important physical problem of establishing the connection between the scaling characteristics of light fields and the structural features of approximants are developed. The stability of the optical characteristics of approximants according to the different methods of their construction and to the bringing phason defects into structure is investigated.

ВЫДЕЛЕНИЕ КРАЕВЫХ ВОЛН ОТ ИМПЕДАНСНОГО КЛИНА МЕТОДОМ РАВНОМЕРНОЙ ТЕОРИИ ДИФРАКЦИИ

к.т.н., доц. Ахияров В.В., д.т.н., проф. Борзов А.Б.,
асп. Каракулин Ю.В., д.т.н., Сучков В.Б.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
vbsuchkov@yandex.ru

В работе рассматривается решение задачи выделения краевых волн от импедансного клина методом равномерной теории дифракции. Представлены результаты расчетов углового распределения поля от неравномерной части тока, полученные с использованием рассмотренного метода и по теории Г.Д.Малюжинца. Приведены угловые диаграммы эффективной площади рассеяния импедансного цилиндра и выполнено сравнение полученных результатов со строгим решением.

Представляющие интерес для практики объекты локации всегда имеют острые кромки и изломы поверхности, которые можно представить в виде клина, поэтому задача дифракции электромагнитных волн на клине является ключевой при расчете ЭПР локационных целей. В работах [1-3] рассмотрена теория и приведены результаты вычислений поля, рассеянного объектами локации, поверхность которых считается идеально проводящей. Результаты были получены в приближении физической оптики (ФО), а при рассеянии от ребер и кромок использовался разработанный П.Я. Уфимцевым метод физической теории дифракции (ФТД) [4]. Далее в работах [5-9] представленная теория была обобщена на случай импедансных тел с использованием решения Г.Д. Малюжинца для вычисления краевых волн от ребра клина. Необходимым условием такого обобщения является выполнение импедансных краевых