Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации (ARMIMP-2020)

ТРУДЫ

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

Серия: АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Выпуск: XIII

Москва, 2020

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

ISBN 978-5-905278-44-0

DOI: 10.25210/armimp-2020

Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 13-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Москва. Россия. 2020.

Рецензенты: проф. Боголюбов А.Н., проф. Кравченко В.Ф.

ARMIMP-2020:
http://www.armimp.ru

Авторы несут ответственность за содержание материалов, представленных в докладах

© Авторы докладов
© НТЦ УП РАН
© РНТОРЭС им. А.С. Попова

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

ISBN 978-5-905278-44-0

DOI: 10.25210/armimp-2020

Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 13-й Международной научно-технической конференции / Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Москва. Россия. 2020.

Рецензенты: проф. Боголюбов А.Н., проф. Кравченко В.Ф.

13-я Международная конференция
АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
12 – 13 октября 2020, Москва, Россия

13th International Conference
ACOUSTOOPTIC AND RADAR METHODS FOR INFORMATION MEASUREMENTS AND PROCESSING
October 12 – 13, 2020, Moscow, Russia

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

PROCEEDINGS

ОРГАНИЗАТОРЫ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российское НТОРЭС им. А.С. Попова,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА:

Журнал «**Физические основы приборостроения**»
ISSN: 2225-4293 http://jfop.ru
Online ISSN: 2712-7885

СОДЕРЖАНИЕ ♦ CONTENTS

СЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОПТИКЕ И РАДИОЛОКАЦИИ. R-ФУНКЦИИ, АТОМАРНЫЕ ФУНКЦИИ, ВЕЙВЛЕТЫ, ФРАКТАЛЫ И ХАОС 7

Асимптотическое представление поля в окрестности конических точек в задачах электромагнитной дифракции на идеально проводящих телах сложной формы
Боголюбов А.Н., Могилевский И.Е., Ровенко В.В. 8

Асимптотическое представление электромагнитного поля в окрестности ребра идеально проводящего цилиндра с двуугольником в сечении
Шушарин М.М., Могилевский И.Е. 10

Математическое моделирование фотонных кристаллов с использованием сверхбыстрых методов расчета
Белов А.А., Боголюбов А.Н., Домбровская Ж.О., Жбанников С.О. 12

Доверительные интервалы и контроль показателей надежности системы по результатам тестирования ее элементов
Павлов И.В., Разгуляев С.В. 14

Метод отражений в задаче дифракции на импедансном клине
Ахияров В.В. 17

Исследование влияния опоры, на которой расположен объект, на рассеянное объектом электромагнитное поле
Евстафьев Е.Е., Шапкина Н.Е., Балабуха Н.П. 20

Анализ оптимального расположения источника излучения в рупорных безэховых камерах
Кузьмич Т.А., Шапкина Н.Е., Балабуха Н.П., Меньших Н.Л. 23

Грубые статистики в радиотехнической разведке сигналов по частоте и пеленгу в системах пассивной радиолокации
Силаев С.А., Горбунов Ю.Н. 25

О фрактальной природе молниевых разрядов
Петров Н.И., Петрова Г.Н. 29

Дробно-рациональная аппроксимация квадратов атомарных функций с помощью формулы Коши
Будунова К.А. 32

Об исследовании эффективности работы беспроводных сетей
Львович И.Я., Преображенский А.П., Чопоров О.Н., Милякова Е.С., Фирсов А.В. 35

Оптимальная стратегия развития российского сегмента спутниковой СВЧ-радиометрии
Данилычев М.В., Аквилонова А.Б., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т. 38

СЕКЦИЯ 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ 45

Интерферометр Майкельсона с резонаторами Фабри-Перо для обнаружения гравитационных волн
Петров Н.И., Пустовойт В.И. 46

Причина уширения линии генерации твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой
Боритко С.В., Балабанов Д.Е. 49

Исследование распределения поля пучка инфракрасного лазера в ячейке высокого давления
Булатов К.М., Храмов Н.А., Носов П.А., Зинин П.В. 52

Видеоэндоскопические приборы для спектральных и геометрических измерений
Хохлов Д.Д., Горевой А.В., Мачихин А.С., Пожар В.Э. 56

Фильтр нарушенного полного внутреннего отражения с включениями наночастиц в резонаторном слое
Петров Н.И. 59

Юстировка интерферометра для контроля формы выпуклых зеркал большого диаметра, работающего по схеме ортогональных лучей
Батшев В.И., Новиков Д.А., Гавлина А.Е., Баландин И.А. 62

Использование статусов программы ZEMAX при моделировании оптических систем с наклонными зеркалами
Федоринов А.С., Качурин Ю.Ю. 64

Лазерная оптическая система с акустооптическими дефлекторами для захвата и перемещения микрообъектов
Виноградов М.А., Носов П.А. 66

Использование АО дифференцирования для выявления спектральных особенностей оптических спектров
Карандин А.В., Боритко С.В. 71

Использование АО дифференцирования для выявления спектральных особенностей оптических спектров
Сакулин С.А., Алфимцев А.Н. 73

Разработка метода коррекции металлических артефактов при томографических исследованиях
Ларионов И.А., Бессонов В.Б., Староверов Н.Е., Клонов В.В. 74

Пьезокерамика системы ЦТС для ультразвуковых методов неразрушающего контроля
Нагаенко А.В., Малыхин А.Ю., Ялынич С.А. 78

Стенд для проведения технологических испытаний твердотельных СВЧ модулей, применяемых в радиолокационных системах
Кирьянов А.Ю. 81

Температурные эффекты в акустооптических модуляторах терагерцевого излучения на основе сжиженного элегаза
Никитин П.А. 85

Трёхмерное моделирование работы акустооптического фильтра терагерцевого излучения на основе гексана
Никитин П.А. 87

Дифференциальный метод измерения амплитуды низкочастотного шума прецизионного источника опорного напряжения
Булатов М.Ф., Кирюхин И.С., Чуриков Д.В. 90

СЕКЦИЯ 4. БИОМЕДИЦИНСКАЯ ИНФОРМАТИКА 93

Ультразвуковая характеризация in vivo тканей эмбрионов рыб
Титов С.А., Бурлаков А.Б., Зинин П.В., Богаченков А.Н. 94

Мультипараметрическая спектральная диагностика рака кожи
Шацкая А.А., Христофорова Ю.А. 97

Сравнение метода анализа всплескообразных биомедицинских сигналов со спектральным методом анализа
Сушкова О.С., Морозов А.А., Габова А.В., Карабанов А.В., Чигалейчик Л.А. 100

Эксперименты с нейросетевой классификацией субтерагерцовых изображений оружия и других опасных предметов, скрытых под одеждой человека
Морозов А.А., Сушкова О.С., Кершнер И.А. 103

Метод диагностики коронавирусной инфекции COVID-19 с использованием нейронных сетей
Смирнов К.В., Вытовтов К.А., Барабанова Е.А. *105*

Моделирование упругих свойств клеток и вирусов: современное состояние
Ванюшин М.В., Носов П.А., Зинин П.В. *108*

Метод максимального подобия для идентификации объектов на биомедицинских изображениях в парадигме машинного обучения на прецедентах
Анциперов В.Е. *111*

Обработка графической информации на основе алгоритмов распознавания, инспирированных зрительным восприятием человека
Анциперов В.Е., Кершнер В.А. *115*

Ранняя диагностика атеросклероза на основе оценки скорости распространения пульсовой волны артериального давления
Анциперов В.Е., Данилычев М.В., Мансуров Г.К. *117*

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ **123**

СЕКЦИЯ 1:
МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОПТИКЕ И РАДИОЛОКАЦИИ. R-ФУНКЦИИ, АТОМАРНЫЕ ФУНКЦИИ, ВЕЙВЛЕТЫ, ФРАКТАЛЫ И ХАОС

Руководители: д.ф.-м.н., проф. **А.Н. Боголюбов**

д.ф.-м.н., проф. **В.Ф. Кравченко**

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОЛЯ В ОКРЕСТНОСТИ КОНИЧЕСКИХ ТОЧЕК В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИФРАКЦИИ НА ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩИХ ТЕЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

д. ф-м н., профессор А.Н. Боголюбов, к. ф-м. н., доцент И.Е. Могилевский, асп. В.В. Ровенко

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет
bogan7@yandex.ru, imogilevsky@mail.ru, rovenko.vladimir@physics.msu.ru

В работе рассматривается исследование трехмерной задачи дифракции электромагнитной волны на ограниченном идеально проводящем теле, имеющем коническую точку. Основное внимание уделено исследованию поведения решения в окрестности конической точки и преодолению трудностей, связанных с построением асимптотического представления.

Ключевые слова: математическое моделирование, асимптотическое разложение, теория дифракции, трёхмерные задачи, конические точки, рёбра, кромки, электромагнитные волны

Введение

Известно, что наличие ребер, кромок и конических точек при решении задач дифракции приводит к появлениям сингулярностей у поля в их окрестностях [1,2], что существенно усложняет применение численных методов для исследования подобных задач. Одним из весьма эффективных способов преодоления этих проблем является построение асимптотического представления решения в окрестности особой точки границы с использованием В.А. Кондратьева [3], а также С.А. Назарова и Б.А. Пламеневского [2].

1. Построение решения

Исследуем трехмерную задачу дифракции электромагнитной волны на ограниченном идеально проводящем теле, имеющем коническую точку (рис. 1):

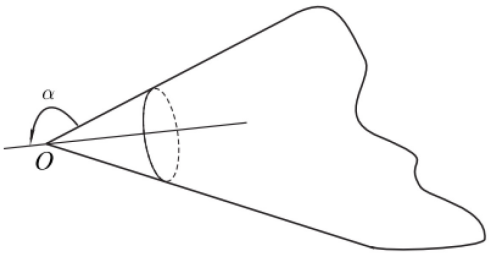


Рис. 1. *Коническая поверхность.*

$$rot\,\bar{H} = -ik\bar{E} + \frac{4\pi}{c}\bar{j}, \operatorname{supp} j \subset D_0 \subset \mathbb{R}^3 \backslash \Omega$$
$$rot\,\bar{E} = ik\bar{H}, \tag{1}$$
$$div\,\bar{H} = 0,$$
$$div\,\bar{E} = 0.$$

Граничные условия имеют вид:

$$(\bar{H}, \bar{n})|_{\partial\Omega} = 0, [\bar{E}, \bar{n}]|_{\partial\Omega} = 0, \tag{2}$$

где $\bar{n}$ – вектор нормали к конической поверхности.
Условие Мейкснера на вершине конуса:

$$\bar{E}, \bar{H} \in (L_2^{loc})^3$$

Используя представления:

$$\bar{E} = rot\,rot\,(\bar{e}_r U_r) + ik\,rot\,(\bar{e}_r V_r),$$
$$\bar{H} = -ik\,rot\,(\bar{e}_r U_r) + rot\,rot\,(\bar{e}_r V_r),$$

где U и V – электрический и магнитный потенциалы Дебая, для которых получаем следующие задачи [4], оставив в левой части оператор Лапласа, а правую часть обозначив как функции $f_{1,2}(M)$:

$$\Delta U = f_1(M), \tag{3}$$
$$U|_{\theta=\alpha} = 0$$
$$\Delta V = f_2(M), \tag{4}$$

$$\left.\frac{\partial V}{\partial \theta}\right|_{\theta=\alpha} = 0$$

С помощью метода, впервые предложенного Кондратьевым [3], строится асимптотическое разложение решения трехмерной задачи дифракции электромагнитной волны на ограниченном теле, содержащем коническую точку. Для задачи (3) оно будет иметь следующий вид:

$$U(r,\theta,\varphi) = \chi\left\{\sum_{-\frac{1}{2}<n_m<\frac{3}{2}} C_{n,m} r^{n_m} P_{n_m}^{(m)}(\cos\theta) e^{im\varphi} + \right.$$
$$\left. + \sum_{-\frac{1}{2}<n_m+1<\frac{3}{2}} D_{n,m} r^{n_m+1} P_{n_m}^{(m)}(\cos\theta) e^{im\varphi}\right\} + \mathfrak{N}(r,\theta,\varphi), \quad (5)$$

где n_m – решения уравнений $P_{n_m}^{(m)}(\cos\alpha) = 0$, $C_{n,m}$ и $D_{n,m}$ – постоянные, $\mathfrak{N}(r,\theta,\varphi)$ – гладкая часть функции $U(r,\theta,\varphi)$, $\chi(r)$ – срезающая функция:

$$\chi(r) = \begin{cases} 1, r \le d/2 \\ 0, r > d \end{cases}, \chi(r) \in C^{\infty}.$$

Для задачи (4) будем иметь совершенно аналогичное представление. Только n_m будут решениями уравнений $\left.\frac{\partial P_{n_m}^{(m)}(\cos\theta)}{\partial\theta}\right|_{\theta=\alpha} = 0$. Разрешимость задач для нахождения n_m показаны на основе подхода, изложенного в [5] для $P_{n_m}^{(m)}(\cos\alpha) = 0$. Основной идеей является разложение $P_{n_m}^{(m)}(\cos\theta)$ и $\frac{\partial P_{n_m}^{(m)}(\cos\theta)}{\partial\theta}$ в ряды относительно $(2\sin\theta)^{-\frac{k}{2}}$, $k = 1, 3, 5 \ldots$ Далее, используя метод математической индукции, мы можем доказать разрешимость $P_{n_m}^{(m)}(\cos\alpha) = 0$ и $\left.\frac{\partial P_{n_m}^{(m)}(\cos\theta)}{\partial\theta}\right|_{\theta=\alpha} = 0$, а также найти соответствующие n_m.

Выводы

Таким образом, построено асимптотическое разложение решения трехмерной задачи дифракции электромагнитной волны на ограниченном идеально проводящем теле, содержащем коническую точку, а также показана возможность такого разложения для условий первого и второго рода. Данный подход может быть применён для решения задач электромагнитной теории дифракции путем асимптотического представления решения в окрестности особых точек границы, а также совмещён с численными методами для уточнения решения задачи [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19.01.00593.

Список литературы

1. Свешников А. Г., Могилевский И. Е. Избранные математические задачи теории дифракции. Москва 2012, 239 с.
2. Назаров С. А., Пламеневский Б. А. Эллиптические задачи в областях с кусочно-гладкой границей. Наука 1991, 334 с.
3. Кондратьев В.А. // Тр. ММО, 16, Издательство Московского университета, М., 1967, 209–292
4. Будак Б. М., Самарский А. А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. Москва «ФИЗМАТЛИТ», 2004, 688 с.
5. H.M. Macdonald// (p. 264–281) Proc. Lond. Math. Soc.,1899.
6. А.Н. Боголюбов, И.Е. Могилевский, В.В. Ровенко и др. "Математическое моделирование задачи дифракции на цилиндре с рёбрами"// 12-я Международная конференция конференции “Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации” (ARMIMP-2019).

THE ELECTROMAGNETIC FIELD ASYMPTOTIC REPRESENTATION IN THE CONICAL POINT VICINITY IN ELECTROMAGNETIC DIFFRACTION PROBLEMS ON IDEAL CONDUCTED COMPLICATED SHAPE BODIES

professor A. N. Bogolyubov, ph. d., associate professor I. E. Mogilevsky, ph. d. student V.V. Rovenko

Lomonosov MSU, faculty of physics

bogan7@yandex.ru, imogilevsky@mail.ru, rovenko.vladimir@physics.msu.ru

The three-dimensional electromagnetic wave diffraction on a perfectly conducting bounded body having a conical point problem is considered in this work. The main attention is paid to solution behaviour in the conic point vicinity and overcoming the difficulties associated with solution asymptotic representation construction.

Keywords: mathematical modeling, asymptotic decomposition, diffraction theory, three-dimensional problems, conical points, edges, edges, electromagnetic waves

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОКРЕСТНОСТИ РЕБРА ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕГО ЦИЛИНДРА С ДВУУГОЛЬНИКОМ В СЕЧЕНИИ

студент Шушарин М.М., к. ф.-м. наук, доцент каф. математики Могилевский И.Е.

Кафедра математики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
nirashush1999@gmail.com, imogilevsky@mail.ru

В докладе рассматривается поведение электромагнитного поля вблизи ребра цилиндра с двуугольником в сечении. Получено разложение поля вблизи ребра в виде суммы сингулярной части и гладкой добавки, для которой дана оценка в норме функционального пространства, впервые предложенного В.А.Кондратьевым.

Ключевые слова: задача дифракции, Кондратьев, поведение вблизи ребра

Введение

В работе рассматривается моделирование электромагнитного поля в безэховой камере. При экспериментальном исследовании дифракции электромагнитных волн на открытых полигонах могут возникать сложности, связанные с транспортировкой, погодными условиями и другими причинами, поэтому зачастую легче проводить эксперименты в закрытых помещениях, в которых различными способами имитируются условия открытого пространства, то есть в компактных полигонах. Безэховая камера представляет собой экранированное помещение с покрытой радиопоглощающим материалом внутренней поверхностью. Геометрия безэховых камер подобрана так, чтобы волны, отражённые от стен, затухали как можно сильнее, прежде чем дойти до приёмника. Однако оборудование, необходимое для проведения эксперимента, также может создавать помехи при измерениях. К примеру, подставка - пилон, на которую помещается исследуемый объект, имеет специфическую (оживальную) форму, подобранную для уменьшения отражения электромагнитных волн обратно к излучателю из соображений геометрической оптики. Она представляет собой наклонный цилиндр с двуугольником (фигура, образованная пересечением двух кругов) в сечении, слабо сужающийся сверху. При этом хорошо известно, что наличие рёбер на границе области приводит к возникновению сингулярностей у электромагнитного поля в их окрестностях [1,2]. Для увеличения точности измерений, производимых в безэховой камере, требуется учесть вклад, вносимый в электромагнитное поле подставкой. Поэтому исследование поля в окрестности ребра пилона является важной и востребованной задачей.

Выделение особенности поля

Пилон предполагается идеально проводящим бесконечным цилиндром, направленным вдоль вертикальной оси с двуугольником в сечении, на который под произвольным углом падает плоская электромагнитная гармоническая волна произвольной поляризации. При таких условиях задача может быть сведена к двумерной.

В работе проводится теоретическое исследование электромагнитного поля в окрестности ребра пилона. При этом используется метод построения асимптотического представления решения в окрестности особой точки границы, впервые предложенный В.А. Кондратьевым [3].

Рассматриваются установившиеся колебания, значит решение будет периодично по времени. Для математической постановки задачи электромагнитное поле представляется в виде суперпозиции падающего и дифрагированного полей. Тогда для дифрагированного поля на бесконечности можно поставить условия излучения Зоммерфельда. Полное поле можно представить, как сумму двух полей, в одном из которых перпендикулярен оси цилиндра вектор напряжённости электрического поля (поле магнитного типа), а в другом перпендикулярен оси вектор напряжённости магнитного поля (поле электрического типа). Тогда из условий идеальной проводимости на границе области можно получить условия Дирихле для вертикальной компоненты напряжённости электрического поля для поля электрического типа и условия Неймана для вертикальной компоненты напряжённости магнитного поля для поля магнитного типа. Наклонное падение плоской волны можно учесть, если искать решение, периодическое вдоль вертикальной оси. Это позволяет свести исследуемую задачу к скалярной краевой задаче для двумерного уравнения Гельмгольца в области вне двуугольника с условиями Зоммерфельда на бесконечности для дифрагированного поля с условиями Дирихле на границе для поля электрического типа и задачу с условиями Неймана для поля магнитного типа. При такой постановке у краевой задачи существует единственное решение [4].

Для выделения особенности поля вводится нормированное функциональное пространство, впервые предложенное в работах В.А. Кондратьева [3]. Для применения этого метода сперва нужно произвести дробно-линейное преобразование координат, которое переведёт двуугольник в бесконечный сектор. Затем всё, кроме главной части уравнения переносится в правую часть и переобозначается за некоторую неизвестную функцию. С помощью условия Мейкснера можно произвести начальную оценку для решения, что позволяет оценить правую часть уравнения в соответствующей норме. Переходя в полярную

систему координат и делая замену радиальной переменной, можно перевести область вне сектора в бесконечную полосу. После преобразования Фурье по новой переменной для Фурье-образа решения получается уравнение, допускающее решение в виде ряда Фурье по синусам для граничных условий Дирихле и по косинусам для условий Неймана. Из вида полученного выражения и соответствующих оценок на правую часть уравнения можно заключить, что Фурье-образ решения представляет собой мероморфную функцию, определённую в полосе на комплексной плоскости и найти расположение её полюсов. В случае условий идеальной проводимости все полюсы будут лежать на мнимой оси. Это позволяет перейти от интегрирования по действительной оси к интегрированию по прямой, расположенной выше на комплексной плоскости, а вычеты в полюсах, лежащих между прямыми, лягут в основу асимптотического представления решения. Интеграл по верхней прямой можно оценить с помощью нормы введённого ранее пространства. Таким образом, получено представление электромагнитного поля в окрестности ребра двуугольника в виде суммы сингулярной части и гладкой добавки, для которой получена оценка в соответствующей норме. Главная особенность поля стремится к нулю на границе как степенная функция с показателем, пропорциональным углу двуугольника. При острых углах показатель меньше единицы, значит уже первая производная вертикальной компоненты поля стремится к бесконечности, а именно через первые производные, согласно уравнениям Максвелла, выражаются остальные компоненты поля.
Полученное представление может быть использовано для повышения скорости сходимости численных методов при математическом моделировании безэховой камеры. Поскольку сингулярная часть поля, благодаря полученному представлению, может быть аппроксимирована точно, проблема сводится к аппроксимации гладкой части.

Выводы

Рассмотрена задача дифракции плоской волны на двуугольный цилиндр. Вблизи ребра цилиндра поле представлено в виде суммы сингулярной части и гладкой добавки, для которой получена оценка в соответствующей норме.

Список литературы

1. А.Г. Свешников, И.Е. Могилевский, Избранные математические задачи теории дифракции, Физический Факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012.
2. И.Е. Могилевский, Вариационно-разностные методы в задачах моделирования волноведущих систем, Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, 2001.
3. В.А. Кондратьев, Краевые задачи для эллиптических уравнений в областях с коническими или угловыми точками, Труды Московского Математического Общества, т.16, 1967, с. 227-313.
4. А. Г. Свешников, А. Н. Боголюбов, В. В. Кравцов, Лекции по математической физике, Физический Факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 1993.

ASYMPTOTIC REPRESENTATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE VICINITY OF THE EDGE OF AN IDEALLY CONDUCTING CYLINDER WITH A BIANGLE IN CROSS-SECTION

student Shusharin M.M., ph. d. sciences Mogilevsky I.E.

Lomonosov Moscow State University, faculty of physics
nirashush1999@gmail.com, imogilevsky@mail.ru

This report deals with behavior of electromagnetic field in vicinity of the edge of an ideally conducting cylinder with a biangle in cross-section. The field is represented as a sum of singular part and smooth additive, which is evaluated through norm of functional space, first introduced by V.A.Kondratiev.

Keywords: diffraction problem, Kondratiev, behavior near an edge

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХБЫСТРЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

к.ф.-м.н. А.А. Белов, д.ф.-м.н. проф. А.Н. Боголюбов, к.ф.-м.н. Ж.О. Домбровская, студ. С.О. Жбанников

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, отделение прикладной математики
bogan7@yandex.ru

Предложен новый экономичный численный метод для расчета распространения электромагнитных волн через фотонный кристалл. Метод может быть применен при наклонном падении волн, закон частотной дисперсии материалов структуры может быть произвольным. Метод обладает сверхбыстрой сходимостью, что позволяет достигать высокой точности даже при небольшом числе шагов.

Исследования электродинамических систем на основе фотонных кристаллов (ФК) - материалов, структура которых характеризуется периодическим изменением коэффициента преломления - вызывает в настоящее время большой теоретический и практический интерес. Интерес к таким задачам обусловлен прежде всего тем, что ФК позволяют строить приборы и устройства, обладающие уникальными свойствами: обладающими малыми потерями очень компактные волноводы; способные работать с большими частотами фотонные сверхпроводники, отлично совмещающиеся с фотонными изоляторами и полупроводниками; оптические запоминающие и логические устройства и целый ряд других систем и устройств. При наклонном падении волны на фотонный кристалл возможно формирование внутри него связанного состояния, распространяющегося вдоль его поверхности; такие связанные состояния широко используются в интегральной фотонике в качестве носителя сигнала.

Весьма эффективными методами, применяемым для исследования свойств фотонно-кристаллических структур и приборов и устройств на их основе, являются методы математического моделирования [1]. Наиболее широко применяемым методом для численного решения таких задач является метод конечных разностей во временной области (FDTD), предложенный в 1966 году К. Йе [2]. Следует отметить, что, хотя в настоящее время алгоритм Йе широко используется в электродинамике, его применение при расчете одномерных фотонных кристаллов связано со значительными трудностями [3]. Кроме того, большинство задач, связанных с математическим моделированием систем и устройств на ФК являются нестационарными.

В данной работе построен, апробирован и реализован сверхбыстрый нестационарный матричный метод для расчета распространения излучения через одномерный ФК. Он основан на методе спектрального разложения, предложенного в [4]. Суть предлагаемого нестационарного матричного метода состоит в следующем. Для линейной задачи расчета одномерного ФК справедлив принцип суперпозиции. Выполним численно Фурье-преобразование падающего излучения, вычисляя интегралы с помощью квадратурной формулы трапеций. В результате получим ряд стационарных задач о падении плоской монохроматической волны на ФК, которые решаем, применяя стандартный стационарный метод матриц Берремана [5]. Таким образом, найдем амплитудные коэффициенты отражения и прохождения. Выполняя численно с помощью формулы трапеций обратное преобразование Фурье, получим временные развертки прошедшего и отраженного полей.

По сравнению с известными методами решения нестационарных задач данный метод имеет ряд преимуществ:

1) он применим не только для нормального, но и для наклонного падения волны на поверхность ФК;

2) он позволяет учитывать произвольный закон дисперсии материальных параметров, в том числе, заданный таблично;

3) он является сверхбыстрым методом, так как квадратурные формулы, реализующие преобразование Фурье, сходятся не степенным, а экспоненциальным образом [6].

Для контроля фактической точности квадратурных формул использовался метод сгущающихся сеток и апостериорные оценки, предложенные в [7]. Верификация метода проводилась на тестовой задаче о наклонном падении импульса на границу раздела диэлектриков. Для этой задачи было построено точное решение. Поэтому такая проверка достаточно представительна.

Рассмотрим задачу о прохождении излучения через ФК в нестационарной постановке. ФК представляет собой структуру, включающую 7 бислоев SiO_2 и Ta_2O_5 толщиной 160 нм и 112 нм соответственно. Поверх последнего слоя Ta_2O_5 располагается покрытие SiO_2 толщиной 260 нм. Угол падения равен 45 градусов. Пусть из SiO_2 на ФК наклонно падает гауссов импульс с центральной длиной волны 800 нм и полушириной на половине высоты 30 нм. На границе раздела "SiO_2-воздух" возникает полное внутреннее отражение и в ФК формируется связанное состояние - блоховская поверхностная волна

(БПВ), которая распространяется вдоль поверхности фотонного кристалла. Поскольку БПВ теряет энергию за счет излучения, время ее жизни, то есть время, за которое интенсивность свечения уменьшается в e раз, оказывается конечным. На рисунке 1 показан спектр отражения описанного ФК, где блоховской волне соответствует узкий минимум в этом спектре.

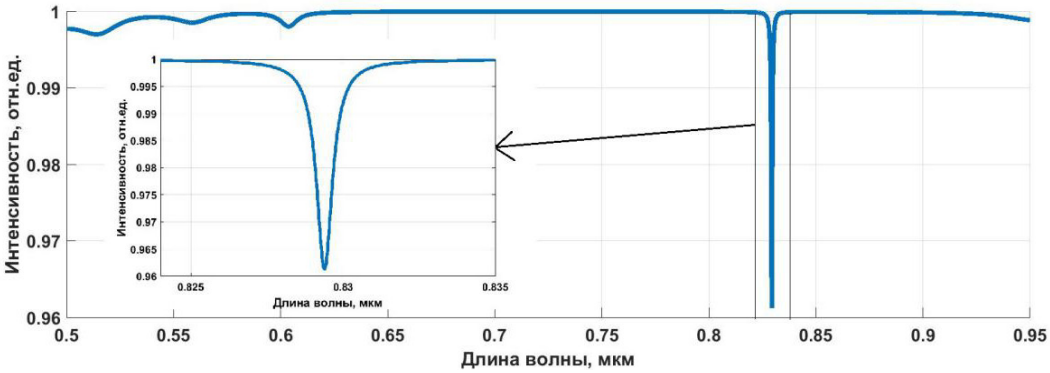


Рис. 1. *Зависимость коэффициента отражения ФК от длины волны.*

Чтобы получить значение времени жизни поверхностной волны с помощью построенного в данной работе нестационарного метода найдем характеристики отраженного импульса. Вычислим кросс-корреляционную функцию падающего и отраженного импульсов, имеющую следующий вид:

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_r(t) I(t-\tau) dt, \tag{8}$$

где $I_r(t)$ и $I(t-\tau)$ интенсивности падающего и отражённого импульсов в определённой точке пространства в моменты времени t и $t-\tau$, соответственно. Если отраженный импульс имеет экспоненциально затухающий "хвост", который соответствует излучению поверхностной волны, то аналогичный "хвост" имеет и кросс-корреляционная функция. В полулогарифмическом масштабе этот "хвост" превращается в прямую линию, по наклону которой можно вычислить время жизни поверхностной волны. Для численного расчета кросс-корреляционной функции используется формула трапеций.

Расчетная кросс-корреляционная функция представлена на рис. 2. Наклон «хвоста» кросс - корреляционной функции дает значение времени жизни БПВ $\tau = 832$ фс. Поскольку время жизни достаточно велико, то данная структура представляется весьма перспективной.

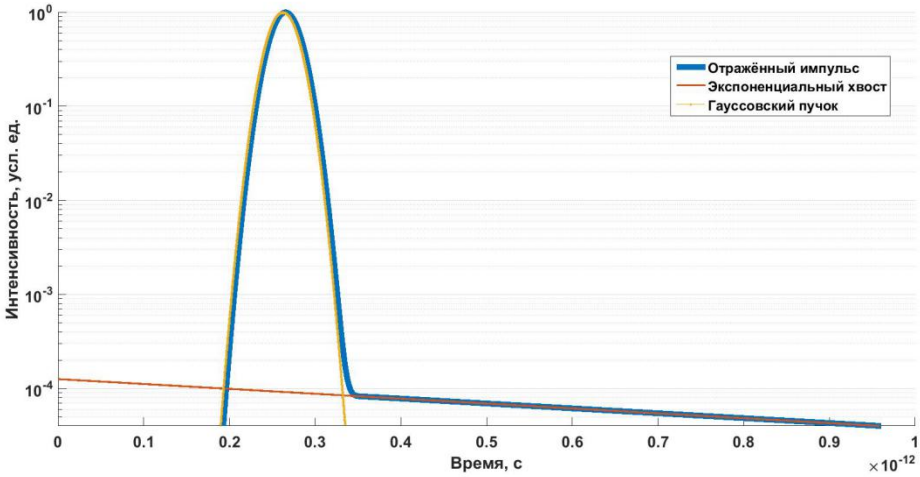


Рис. 2. *Кросс - корреляционная функция для рассматриваемого ФК.*

Работа подготовлена при поддержке РФФИ (проект 19-01-00593А).

Список литературы

1. Ж.О.Домбровская, Ю.В.Мухартова, А.Н.Боголюбов, Н.А.Боголюбов. Математическое моделирование электродинамических систем на основе метаматериалов // Физические основы приборостроения, 2019. Т.8 ,№3. С.7-18.
2. Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell ‘s equations in isotropic media // IEEE Transactions of Antennas and Propagations. 1966. V.14, No. 3. P. 302-307.
3. Dombrovskaya Zh. O., Belov A. A. Difficulties faced by Yee’s scheme in photonics problems // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1461. P. 012032.
4. Белов А.А., Домбровская Ж.О. Бикомпактная разностная схема для уравнений Максвелла в слоистых средах // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2020. Т. 492. С. 15–19.
5. Berreman D. W. Optics in Stratified and Anisotropic Media: 4×4-Matrix Formulation // Journal of the Optical Society of

America. 1972. V. 62, No. 4. P. 502.
6. Калиткин Н.Н., Колганов С.А. Квадратурные формулы с экспоненциальной сходимостью и функции Ферми-Дирака // Доклады академии наук. 2017. Т. 473, № 4. С. 401–403.
7. Калиткин Н.Н., Белов А.А. Аналог метода Ричардсона для логарифмически сходящегося счета на установление // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452, № 3. С. 261–265.

MATHEMATICAL MODELING OF PHOTONIC CRYSTALS USING ULTRAFAST CALCULATION METHODS

Belov A.A., Bogolyubov A.N., Dombrovskaya Zh. O., Zhbannikov S.O.

Department of Applied Mathematics, Faculty of Physics,
M.V. Lomonosov Moscow State University
bogan7@yandex.ru

A new method is proposed and implemented for solving unsteady problems of photonics on the passage of radiation through a photonic crystal. This method allows you to take into account the inclined incidence, as well as the law of dispersion and the shape of the pulse, given in an arbitrary form. This method has ultrafast convergence, which allows us to obtain a solution with high accuracy even on moderate grids with a small number of steps.

Keywords: mathematical modeling, anechoic chamber, radio absorbing material

CONFIDENCE INTERVALS AND CONTROL OF SYSTEM RELIABILITY INDICATORS BASED ON THE TEST RESULTS OF ITS ELEMENTS

professor Pavlov I.V., graduate student Razgulyaev S.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
ipavlov@bmstu.ru, sergach_91@mail.ru

The report discusses the task of assessing the probability of uptime for a given time (reliability function) for a complex system's model consisting of several subsystems that use a common backup scheme. It is assumed that redundant elements in various subsystems can operate in both hot and cold redundancy modes. Analytical calculation formulas are obtained that allow to find the system reliability function depending on the reliability parameters of elements and the multiplicity of hot and cold redundancy in various subsystems. The asymptotic expressions are found for the lower confidence limit for the probability of failure-free operation of the system based on the results of testing the elements of the system for reliability. Approximate formulas are also given for calculating the reliability function of the system and the lower confidence limit for the probability of failure-free operation of the system for a given time interval.

Key words: reliability, system, hot redundancy, cold redundancy, confidence limits

In many cases the reliability indicators of complex systems are controlled by building confidence intervals with a given level of confidence for reliability indicators based on the results of tests of the system or its individual elements. Existing methods for the trust assessment of the reliability indicators of complex systems based on the test results of their individual components have been developed mainly for models of systems with structures of a series-parallel type with hot redundancy of elements (for example, [1] – [18] and etc.). The paper discusses a more general redundancy scheme, where a loaded redundancy of elements and the presence of an additional cold reserve are possible. Consider a system consisted from m series connected subsystems, where each i-th subsystem consists from $(n_i + r_i)$ elements of the same type, where $n_i \geq 1$ elements operate in hot and r_i in cold redundancy, $i = 1, \dots, m$. Further, we will assume that the reliability function of the element of the i-th subsystem is $p_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, where $\lambda_i > 0$ – the parameter of the failure rate of elements of the i-th type and failures of elements of the system occur independently of each other.

The system reliability function for this model has the form

$$P_c(\lambda, t) = \prod_{i-1}^{m} P_i(\lambda_i, t) \quad (1)$$

where $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m)$ – vector of reliability parameters of system's elements, $P_i(\lambda_i, t)$ – reliability function of the i-th subsystem, which is determined by the expression

$$P_i(\lambda_i, t) = \mathrm{P}\{\xi_i + \eta_i > t\} \quad (2)$$

where random variable ξ_i is r_i-multiple convolution of random variable with exponential distribution density $n_i\lambda_i \exp(-n_i\lambda_i t)$. Thus, random variable ξ_i has an Erlang distribution [1], with shape r_i [15] and scale $n_i\lambda_i$. Random variable η_i in expression (2) is the uptime of the subsystem that consists from n_i elements of i-th type, operating in the hot redundancy mode with the reliability function, which is determined by the well-known expression $G_i(\lambda_i, t) = 1 - [1 - \exp(-\lambda_i t)]^{n_i}$. At the same time random variables ξ_i, η_i in (2) are independent due to the exponential distribution of uptime $p_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, $i = 1, \dots, m$. In accordance with the (2), the reliability function of the i-th subsystem can be represented further in the following form

$$P_i(\lambda_i, t) = 1 - \int_0^t f_i(\lambda_i, t)[1 - G_i(\lambda_i, t - u)]du =$$

$$= 1 - \frac{(n_i\lambda_i)^{r_i}}{(r_i - 1)!} \int_0^t u^{r_i - 1} \exp(-n_i\lambda_i u) * \{1 - \exp[-\lambda_i(t - u)]\}^{n_i} du$$

whence $\quad 1 - P_i(\lambda_i, t) = \frac{(n_i\lambda_i)^{r_i}}{(r_i-1)!} \sum_{k=0}^{n_i} (-1)^k C_{n_i}^k \exp(k\lambda_i u) \int_0^t u^{r_i-1} \cdot \exp[(k - n_i)\lambda_i u]\, du$

From these expressions and (1) the general expression for the system reliability function is follows

$$P_c(\lambda, t) = \prod_{i=1}^{m} H(n_i, r_i, \lambda_i t)$$

where function $H(n, r, \lambda t)$ has the form

$$H(n, r, \lambda t) = 1 - n^r \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(-1)^k}{(n - k)^r} C_n^k \exp(-k\lambda t) * \{1 - L_r[(n - k)\lambda t]\} + (-1)^{n+1} \frac{(n\lambda t)^r}{r!} \exp(-n\lambda t),$$

where $L_r(z) = \sum_{j=0}^{r-1} \frac{z^j}{j!} \exp(-z), \quad n \geq 1, r \geq 1.$

BUILDING A LOWER CONFIDENCE LIMIT FOR THE SYSTEM RELIABILITY FUNCTION

The exact values of the parameters of the reliability of the elements λ_i are most often unknown and it is required to construct a lower confidence limit for the reliability function of the system according to the results of testing its elements. Further, we will assume that the tests of the system elements were carried out according to standard plans of the type $[N_i\ B\ T_i]$ (in the notation of the book [1]) i.e. N_i elements of the i-th type were put for testing during the time T_i, as a result of which d_i failures were observed, $i = 1, \dots, m$.

The system reliability function can be represented as

$$P_c(\lambda, t) = \exp\left[-\sum_{i=1}^{m} \Lambda_i(n_i, r_i, \lambda_i t)\right]$$

where $\Lambda_i(n_i, r_i, \lambda_i t)$ is a leading function [5] for i-th subsystem,

$$\Lambda_i(n_i, r_i, \lambda_i t) = -\ln H(n_i, r_i, \lambda_i t), \qquad i = 1, \dots, m \quad (3)$$

Random variables used in expression (2) ξ_i, η_i have IFRF-distribution (increasing Failure Rate Function). In accordance with the known results [17], [18],[19] their sum $\xi_i + \eta_i$ also has IFRF-distribution, whence follows, that leading function for each i-th subsystem (3) is convex in $\lambda_i \geq 0$ for each fixed $t \geq 0$, $i = 1, \dots, m$. Accordingly, the leading function of the system as a whole is

$$\Lambda(\lambda, t) = \sum_{i=1}^{m} \Lambda_i(n_i, r_i, \lambda_i t)$$

convex by vector $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m) \in E_m$, where $E_m = \{\lambda\colon\ \lambda \geq 0,\ i = 1, \dots, m\}$ – the set of possible values of the vector of parameters of reliability of system elements $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m)$. The task of confidence estimation of the system reliability function $P_c(\lambda, t)$ from the bottom is reduced to constructing the upper confidence limit for the leading function $\Lambda(\lambda, t)$ that convex in E_m. We state the statistics $D = \sum_{i=1}^{m} d_i$. Using the general expressions obtained above for the system reliability function, we find further the following lower γ-confidence limit for the system reliability function $\underline{P_c}(d, t) = \min_{i=1,\dots,m} H\{n_i, r_i, [\Delta_\gamma(D)t/N_iT_i]\}$. The above formulas for the system reliability function and its lower confidence limit in the general case for arbitrary model parameters m, n_i, r_i, $i = 1, \dots, m$ are rather cumbersome. The following are simpler approximate asymptotic expressions for these functions. For $\lambda_i t \to 0, i = 1, \dots, m$ system reliability function has the form

$$P_c(\lambda, t) = \prod_{i=1}^{m} \left\{1 - \frac{n_i^{r_i+1}(n_i - 1)!}{(n_i + r_i)!} (\lambda_i t)^{n_i + r_i}[1 + o(1)]\right\}$$

We also donate $Q_c(\lambda, t) = 1 - P_c(\lambda, t)$ – probability of system failure on the interval $(0, t)$. Then for $\lambda_i t \ll 1$, $i = 1, \dots, m$ $\underline{P_c}(d, t) = 1 - \overline{Q_c}(d, t)$, where $\overline{Q_c}(d, t)$ – upper γ-confidence limit for the probability of system's failure

$$\overline{Q_c}(d, t) \cong \max_{i=1,\dots,m} \frac{n_i^{r_i+1}(n_i-1)!}{(n_i+r_i)!} \left[\frac{\Delta_\gamma(D)t}{N_i T_i}\right]^{n_i+r_i}$$

where $n_i \geq 1, r_i \geq 0, i = 1, \dots, m$. This expression contains particular cases when in some subsystems only hot (for $r_i = 0$) or only cold (for $n_i = 1, r_i \geq 1$) redundancy is used.

Thus, for a system model with a general redundancy scheme in various subsystems, exact calculation formulas for the system reliability function are obtained, as well as approximate asymptotic expressions for this function in the asymptotics. A lower confidence limit is also constructed for the probability of a system failing operation for a given time based on the results of tests of individual elements of the system and approximate formulas for calculating this confidence limit are obtained.

References

1. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. Mathematical methods of reliability theory. 2nd ed. / Moscow: Librokom Publ., 2013. 582 p.
2. Barzilovich E.Yu., Beliaev Yu.K., Kashtanov V.A. a.o. Questions of the mathematical theory of reliability / ed. by Gnedenko B.V. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1983. 376 p.
3. Barlow R.E., Proschan F. Statistical theory of reliability and life testing: probability models. / N.Y.; L.: Holt, Rinehart and Winston, 1975. 290 p.
4. Mann Nancy R., Schafer Rae E., Singpurwalla Nozer D. Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data. / Wiley, 1974, 576 p.
5. Gnedenko B.V., Pavlov I.V., Ushakov I.A. Statistical reliability engineering. / N.Y.: John Wiley & Sons. 1999. 517 p.
6. Mann NR, Grubbs FE. Approximately optimum confidence bounds on series system reliability for exponential time to fail data. // Biometrika 1972, 191-204 pp.
7. Pavlov I. V., Razgulyaev S. V. Estimated Guaranteed Life for a System Model with Redundancy of Heterogeneous Elements // Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences. 2019. № 6, pp. 4-17.
8. Emmanuel J, Marquez R, Levitin G. Algorithm for estimating reliability confidence bounds of multi-state systems. // Reliability Engineering & System Safety. 2008. Vol. 93. No. 8. pp. 1231-1243.
9. Hryniewicz O. Confidence bounds for the reliability of a system from subsystem data. // RT&A. 2010; 1: pp. 145-160.
10. Pavlov I. V., Razgulyaev S. V. Reliability Assessment for a System with Loaded Reservation and Recovery Based on the Results of Testing Its Elements. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. No. 4. P. 368-372
11. Pavlov I.V. Estimating reliability of redundant system from the results of testing its elements. // Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78. № 3. pp. 507-514.
12. Pavlov I.V. Confidence limits for system reliability indices with increasing function of failure intensity. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. Vol. 46. № 2. pp. 149-153.
13. Lixuan Lu, Gregory Lewis. Configuration determination for k-out-of-n partially redundant systems. // Reliability Engineering & System Safety. Vol. 93. Issue 11. 2008, pp. 1594-1604.
14. M. J. Zuo, Tian Zhigang. Performance evaluation of generalized multi-state k-out-of- n systems. // IEEE Transactions on Reliability. Vol. 55. Issue 2. 2006. pp. 319-327.
15. Wei-Chang Yeh. A simple algorithm for evaluating the k-out-of-n network reliability. // Reliability Engineering & System Safety. Vol. 83. Issue 1. 2004. pp. 93-101.
16. Zhang M, Hu Q, Xie M, Yu D. Lower confidence limit for reliability based on grouped data using a quantile-filling algorithm. // Computational Statistics and Data Analysis. 2014. Vol. 75. No. 6. pp. 96-111.
17. Barlow R. and Proschan F. Mathematical Theory of Reliability. / N.Y.: John Wiley & Sons, 1965. 497 p.
18. Goryainov, V.B., Pavlov, I.V., et al., Matematicheskaya statistika (Mathematical Statistics) / Moscow: N.E. Bauman Moscow State Technical Univ., 2008, 424 p.
19. W.I. Zangwill. Nonlinear Programming a unified approach. / Prentice - Hall, Inc., Englewood, Cliffs, W.J., 1969, 453p.

ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ И КОНТРОЛЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕСТИРОВАНИЯ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Павлов И.В., Разгуляев С.В.

МГТУ им. Баумана

ipavlov@bmstu.ru, sergach_91@mail.ru

В докладе рассматривается задача оценки вероятности безотказной работы за заданное время (функция надежности) для модели сложной системы, состоящей из нескольких подсистем, использующих общую схему резервного копирования. Предполагается, что резервные элементы в различных подсистемах могут работать как в горячем, так и в холодном режимах резервирования. Получены аналитические расчетные формулы, позволяющие найти функцию надежности системы в зависимости от параметров надежности элементов и кратности горячего и холодного резервирования в различных подсистемах. Найдены асимптотические выражения для нижнего доверительного предела вероятности безотказной работы системы по результатам испытаний элементов системы на надежность. Приведены также приближенные формулы для расчета функции надежности системы и нижнего доверительного предела вероятности безотказной работы системы на заданном интервале времени.

Ключевые слова: надежность, система, горячее резервирование, холодное резервирование, доверительные пределы

МЕТОД ОТРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ДИФРАКЦИИ НА ИМПЕДАНСНОМ КЛИНЕ

ведущий инженер[1], старший научный сотрудник[2], к.т.н. Ахияров В.В.

[1]ОАО НПК НИИ Дальней Радиосвязи (ОАО НПК НИИДАР),
[2]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
vakhiyarov@gmail.com

Получено строгое решение задачи дифракции на импедансном клине методом отражений, которое полностью соответствует теории Г.Д. Малюжинца. Установлена связь отраженных полей с листами Римановой поверхности и представлены результаты расчетов коэффициента дифракции, полученные методом отражений.

Ключевые слова: метод отражений, импедансный клин, решение Малюжинца, коэффициент дифракции.

Введение

Решение задачи дифракции на идеально проводящем клине методом отражений было получено П.Я. Уфимцевым [1]. Идея метода заключается в следующем: в первом приближении дифракционные поля определяются методом параболического уравнения, далее полученное решение в «физической» области, ограниченной внешним углом клина, последовательно уточняется волнами, пришедшими из «нефизической» области. Метод отражений позволяет наполнить формальное решение задачи дифракции на клине физическим содержанием, если считать, что каждое отражение связано с соответствующим листом римановой поверхности [2, 3].

В данной работе рассмотренный П.Я. Уфимцевым метод отражений для идеально-проводящего клина обобщается на случай импедансных граничных условий, полученное решение полностью соответствует теории Г.Д. Малюжинца.

Постановка задачи

Пусть плоская волна единичной амплитуды падает на клин под углом ϕ_0 (см. рис.1), требуется определить угловое распределение дифракционного поля методом отражений. Считаем, что на гранях $\phi = 0$ и $\phi = n\pi$ (число n определяет внешний угол клина) выполняется импедансное краевое условие:

$$\frac{\partial u}{\partial n} \pm jk \sin\theta_{\pm}^{E,H} u = 0\,, \tag{1}$$

где $\partial/\partial n = (1/r)\partial/\partial\phi$ – производная по нормали, знаки «+» и «–» соответствуют углам $\phi = 0$ и $\phi = n\pi$, $\theta_{\pm}^{E} = \arcsin\left(\eta_{\pm}^{-1}\right)$, $\theta_{\pm}^{H} = \arcsin\left(\eta_{\pm}\right)$ – комплексные постоянные для соответствующей грани при E- и H-поляризации падающего поля. Зависимость поля от времени $e^{j\omega t}$ опускается.

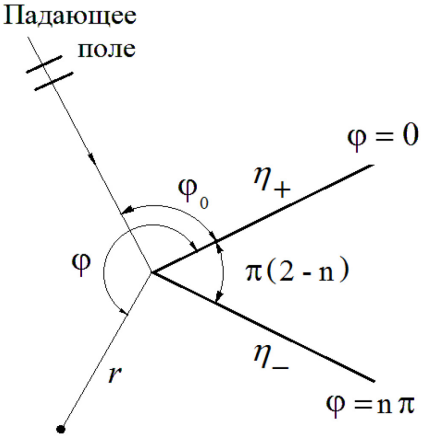


Рис. 1. *Падение плоской волны на клин.*

Математическое описание метода отражений

Угловое распределение поля, рассеянного импедансным клином, определяется коэффициентом дифракции Г.Д. Малюжинца [4]:

$$D(\phi) = \frac{1}{n}\frac{\sin(\phi_0/n)}{\Psi(\Theta-\phi_0)}\cdot\left\{\frac{\Psi(\Theta-\phi-\pi)}{\cos((\phi+\pi)/n)-\cos(\phi_0/n)} - \frac{\Psi(\Theta-\phi+\pi)}{\cos((\phi-\pi)/n)-\cos(\phi_0/n)}\right\}, \tag{2}$$

где

$$\Psi(\alpha)=\psi_\Theta(\alpha+\Theta+\pi/2-\theta_+)\,\psi_\Theta(\alpha+\Theta-\pi/2+\theta_+)\times \\ \times\psi_\Theta(\alpha-\Theta-\pi/2+\theta_-)\,\psi_\Theta(\alpha-\Theta+\pi/2-\theta_-), \tag{3}$$

$\Theta=n\pi/2$, $\psi_\Theta(x)$ – функция Малюжинца [4, 5].

Представим $D(\phi)$ в виде:

$$D(\phi)=D_1(\phi-\phi_0)-D_2(\phi+\phi_0) \tag{4}$$

где слагаемые $D_{1,2}(\phi\mp\phi_0)$ связаны с падающей и отраженной волной:

$$D_{1,2}(\phi\mp\phi_0)=-\frac{1}{2n}\left[ctg\left(\frac{\pi+(\phi\mp\phi_0)}{2n}\right)\Gamma_-(\phi_0,\phi)+ctg\left(\frac{\pi-(\phi\mp\phi_0)}{2n}\right)\Gamma_+(\phi_0,\phi)\right], \tag{5}$$

$$\Gamma_\pm(\phi_0,\phi)=\frac{\Psi(\Theta-\phi\pm\pi)}{\Psi(\Theta-\phi_0)}. \tag{6}$$

Поскольку коэффициент $\Gamma_\pm(\phi_0,\phi)$ зависит как от угла падения φ_0, так и от угла рассеяния φ, его можно назвать обобщенным коэффициентом отражения [6]. По аналогии с коэффициентами отражения плоской волны от граней клина

$$R_+(\phi_0)=\frac{\sin(\phi_0)-\sin(\theta_+)}{\sin(\phi_0)+\sin(\theta_+)}, \tag{7.а}$$

$$R_-(\phi_0)=\frac{\sin(n\pi-\phi_0)-\sin(\theta_-)}{\sin(n\pi-\phi_0)+\sin(\theta_-)}, \tag{7.б}$$

будем считать, что значения $\Gamma_+(\phi_0,\phi)$ связаны с гранью $\phi=0$, а $\Gamma_-(\phi_0,\phi)$ – с гранью $\phi=n\pi$ (рис. 1). Для того, чтобы получить решение задачи дифракции на импедансном клине методом отражений, выполним подстановку

$$ctg\left(\frac{\psi}{2n}\right)=2n\left(\frac{1}{\psi}+\sum_{m=1}^{\infty}\left(\frac{1}{\psi-2\Theta m}+\frac{1}{\psi+2\Theta m}\right)\right) \tag{8}$$

в выражение (5):

$$D_{1,2}(\phi\mp\phi_0)=\left[\frac{\Gamma_-(\phi_0,\phi)}{\phi\mp\phi_0-\pi}+\sum_{m=1}^{\infty}\left(\frac{\Gamma_-(\phi_0,\phi)}{\phi\mp\phi_0-\pi+4\Theta m}+\frac{\Gamma_-(\phi_0,\phi)}{\phi\mp\phi_0-\pi-4\Theta m}\right)-\right. \\ \left.-\frac{\Gamma_+(\phi_0,\phi)}{\phi\mp\phi_0+\pi}+\sum_{m=1}^{\infty}\left(\frac{\Gamma_+(\phi_0,\phi)}{\phi\mp\phi_0+\pi+4\Theta m}+\frac{\Gamma_+(\phi_0,\phi)}{\phi\mp\phi_0+\pi-4\Theta m}\right)\right], \tag{9}$$

где слагаемые $\Gamma_-(\phi_0,\phi)/(\phi\mp\phi_0-\pi)$ и $\Gamma_+(\phi_0,\phi)/(\phi\mp\phi_0+\pi)$ определяют угловую диаграмму первичного дифракционного поля, которое соответствует решению методом параболического уравнения (ПУ):

$$D_{1,2}^{ПУ}(\phi\mp\phi_0)=\left[\frac{\Gamma_-(\phi_0,\phi)}{\phi\mp\phi_0-\pi}-\frac{\Gamma_+(\phi_0,\phi)}{\phi\mp\phi_0+\pi}\right]. \tag{10}$$

Т.о., подстановка (10) в (4) дает первое приближение в «физической» области $0<\phi<n\pi$, ограниченной внешним углом клина, которое последовательно уточняется волнами, пришедшими из «нефизической» области $4\Theta m-\pi<\phi<4\Theta m+\pi$, а значения $m=\pm1,\pm2,\pm3,...$ определяют соответствующий лист римановой поверхности.

Выражению (9) можно придать еще большую наглядность, если представить обобщенный коэффициент отражения (6), соответствующий *m*-му риманову листу, в виде:

$$\Gamma_\pm(\phi_0,\phi)=\Psi(\Theta-\phi\pm\pi)\frac{\prod_{i=1}^{m}R_+(-\phi_0-2\Theta+4i\Theta)R_-(-\phi_0+4i\Theta)}{\Psi(\Theta-\phi_0+4\Theta m)},\ m\ge1, \tag{11.а}$$

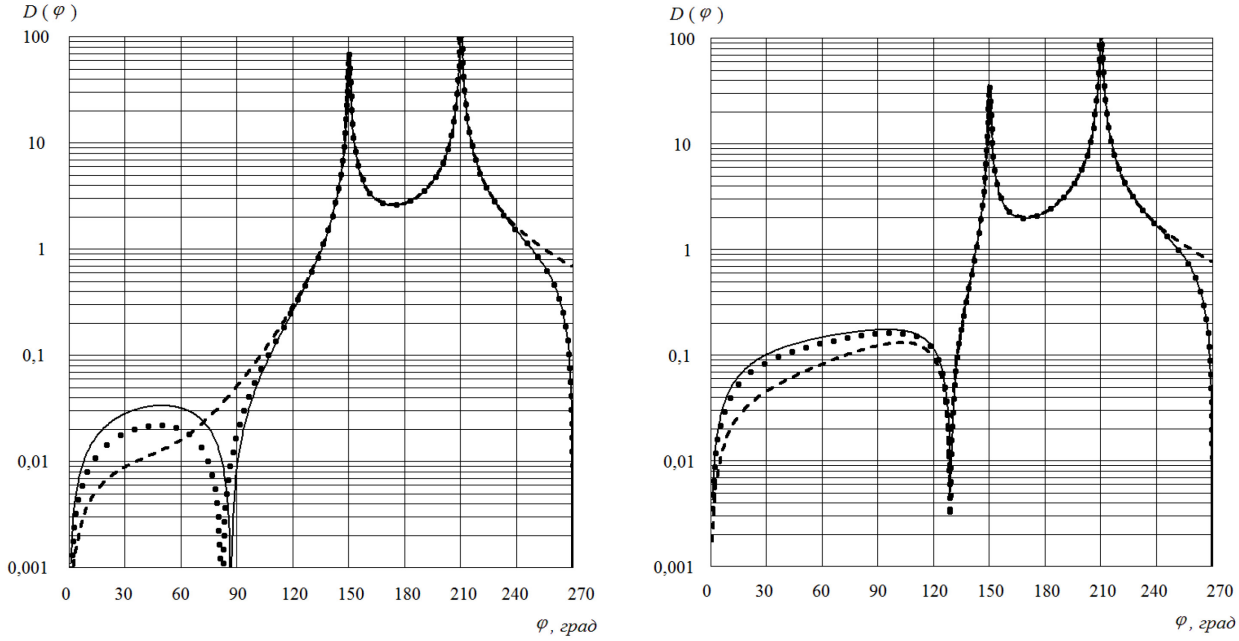
$$\Gamma_\pm(\phi_0,\phi)=\Psi(\Theta-\phi\pm\pi)\frac{\prod_{i=-1}^{-m}R_+(\phi_0-4\Theta+4i\Theta)R_-(\phi_0-2\Theta+4i\Theta)}{\Psi(\Theta-\phi_0+4\Theta m)},\ m\le-1. \tag{11.б}$$

Из (11.а, б) следует, что поле, возвращаемое в физическую область *m*-м листом римановой поверхности, зависит от произведения коэффициентов отражения (7.а, б), однако итоговый результат вычисления $\Gamma_\pm(\phi_0,\phi)$ не связан с числом *m*, поскольку (11.а, б) является просто иной формой записи обобщенного

коэффициента (6). Представление (6) в виде (11.а, б) требуется для того, чтобы связать $\Gamma_{\pm}(\phi_0, \phi)$ с листами римановой поверхности.

Результаты расчетов коэффициента дифракции методом отражений

На рис.2 представлены результаты расчетов $D(\phi)$ при $n = 1,5$ (внутренний угол при вершине клина равен 90^0), $\eta_{\pm} = \pi/4$ и $\phi_0 = 30^0$ для *E*- и *H*-поляризации падающего поля. Сплошная линия соответствует строгому решению Г.Д. Малюжинца (2), пунктир и штриховая линия – результат подстановки (9) при $m = 1$, что соответствует одному отражению, и (10) в (4). Видно, что в области геометрической тени $\phi \in [210^0...270^0]$ решение методом ПУ приводит к существенной ошибке вычислений, однако учет всего одного отражения дает полное соответствие с теорией Г.Д. Малюжинца. Отметим, что расчеты методом отражений для выбранных условий задачи совпадают со строгим решением (2) при $m = 10$ для *E*-поляризации и при $m = 5$ для *H*-поляризации во всем диапазоне $\phi \in [0^0...270^0]$.



а) б)

Рис. 2. *Угловая зависимость коэффициента дифракции.*
Сплошная линия – решение Г.Д. Малюжинца (2),
штриховая линия – решение ПУ, пунктир – метод отражений при $m = 1$.
а) – Е-поляризация, б) – Н-поляризация

Выводы

В работе представлены аналитические выражения для вычисления дифракционного поля от ребра импедансного клина методом отражений. С использованием формальных математических приемов было показано, что первым приближением для дифракционных полей, связанных с падающей и отраженной волной, является решение параболического уравнения, которое последовательно уточняется волнами, возвращенными в физическую область листами римановой поверхности.

Полученное решение отличается от результатов для идеально проводящего клина наличием обобщенного коэффициента отражения (6), поэтому результаты П.Я. Уфимцева [1] можно рассматривать как частный случай выражения (9), которое соответствует решению Г.Д. Малюжинца.

Список литературы

1. Уфимцев П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. Пер с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 366 с.
2. Ufimtsev P. Ya. Primary Shadow Radiation and Classical Models of Black Bodies // Electromagnetics, 1996, pp.91-112.
3. Ахияров В.В. Методы решения задачи дифракции на черном экране // Электромагнитные волны и электронные системы, 2017, Т. 22, № 1. С. 14-22.
4. Малюжинец Г.Д. Возбуждение, отражение и излучение поверхностных волн на клине с заданными импедансами граней // Доклады АН СССР. 1958. т.121. №3. с.436-439.
5. Ахияров В.В. Вычисление функции Малюжинца в задаче дифракции на клине с импедансными гранями // Электромагнитные волны и электронные системы, 2016, Т. 21, № 8. – С. 41-49.
6. Мицмахер М.Ю. Обобщенный коэффициент отражения при дифракции плоской электромагнитной волны на импедансном клине. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика, 1976, Т. 19, № 10. С. 1519-1522.

REFLECTION METHOD IN THE IMPEDANCE WEDGE DIFFRACTION PROBLEM

Leading Engineer[1], Senior Research Scientist[2], Akhiyarov V.V.

[1]Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications (SRI for LDRC), Moscow, Russia
[2]Kotelnikov Institute of radioengineering and electronics of RAS
vakhiyarov@gmail.com

The rigorous solution of the diffraction problem on the impedance wedge by the reflection method, which corresponds to the G.D. Malyuzhints' theory is obtained. The connection between the reflected fields and the sheets of the Riemann surface is established and the results of diffraction coefficient calculations by reflection method are presented.

Keywords: reflection method, impedance wedge, Malyuzhinets' solution, diffraction coefficient.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПОРЫ, НА КОТОРОЙ РАСПОЛОЖЕН ОБЪЕКТ, НА РАССЕЯННОЕ ОБЪЕКТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

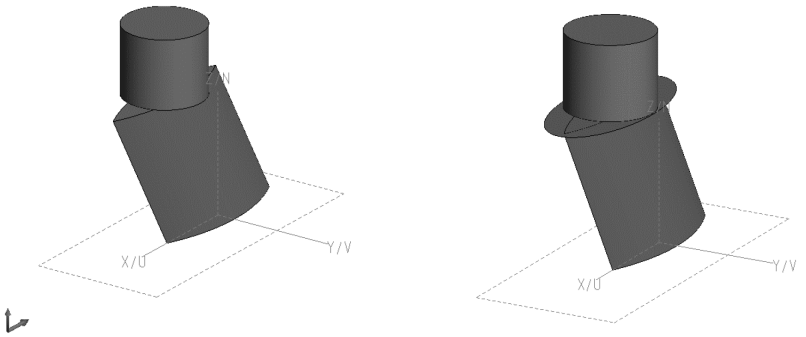
студент Евстафьев Е.Е[1]., к.ф.-м.н. Шапкина Н.Е.[1,2], к.т.н. Балабуха Н.П.[2]

[1]МГУ им. М.В.Ломоносова
[2]ИТПЭ РАН
egorezbalka@gmail.com

При изучении рассеяния электромагнитных волн исследуемый объект часто размещается на металлической опоре, рассеянное поле которой искажает поле объекта. В данной работе анализируется влияние. В качестве модельного объекта рассматривается круглый цилиндр. Рассчитано рассеяние поля на конструкциях объект-пилон и объект-экран-пилон для частот от 1ГГц до 2ГГц.

Ключевые слова: рассеянное электромагнитное поле, пилон, математическое моделирование

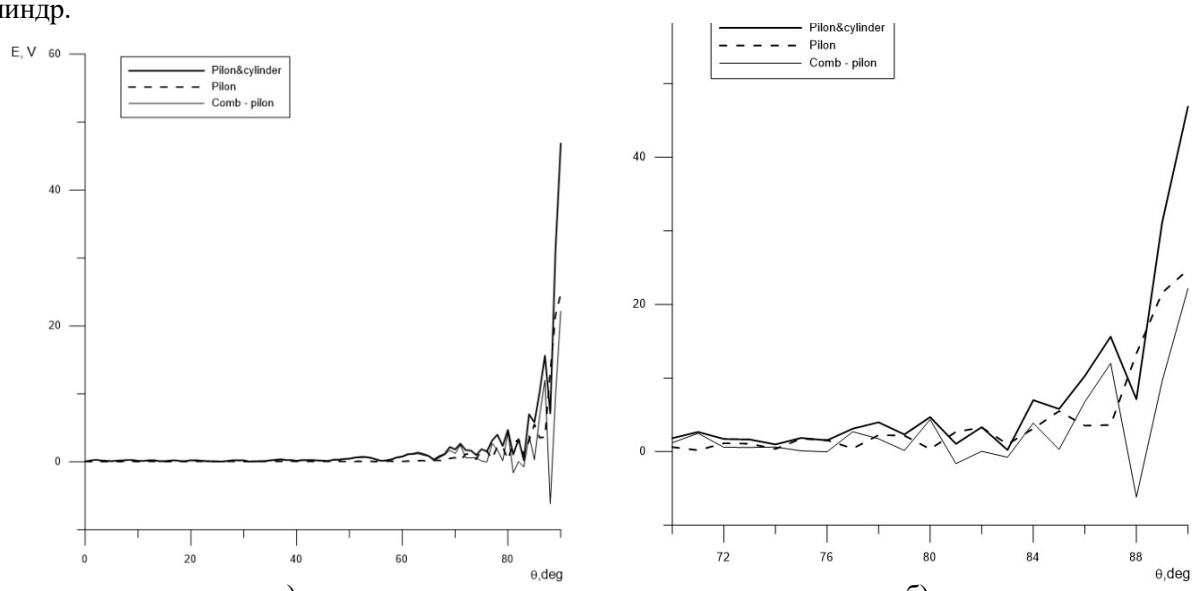
Эксперимент по изучению рассеяния электромагнитного поля на объектах проводится либо на открытых полигонах, либо в закрытых помещениях, называемых компактными полигонами. Последний способ предполагает размещения объекта в рабочей зоне БЭК (безэховой камеры), стены которой покрыты радиопоглощающим материалом, чтобы имитировать свободное пространство и не учитывать влияние стен помещения. Сам объект размещается на специальной опоре (пилоне, рис. 1а), имеющей форму оживала в поперечном сечении, наклонённого против направления падения плоской электромагнитной волны для уменьшения ЭПР (эффективной площади рассеяния) опоры.



а) б)

Рис. 1. *Изображение объекта на опоре без защитного экрана (а) и с защитным экраном (б).*

Металлическая опора вносит искажения в результаты измерения ЭПР исследуемого объекта как наличием вклада рассеянного на пилоне поля в суммарное отражённое поле, так и вследствие переотражения рассеянного на пилоне поля на объекте. Для того, чтобы минимизировать влияние опоры разрабатываются различные экспериментальные и вычислительные методы. Чтобы учесть влияние опоры сначала проводятся измерение рассеянного поля, при наличии пилона, но без объекта, а затем с объектом. Далее из суммарного рассеянного поля вычитается поле, отражённое от опоры. На Рис.2 изображена зависимость модуля электрической составляющей рассеянного поля от угла Ѳ, пунктирной линией обозначен график, соответствующий полю опоры, пунктир-точкой – соответствующий полю комбинации пилон-цилиндр, сплошной линией – поле, полученное вычитанием поля пилона из поля комбинации пилон-цилиндр.



а) б)

Рис. 2. *На графиках изображена зависимость модуля напряжённости поля для пилона от угла Ѳ с помещённым на него цилиндром (жирная линия), пилона без объекта(пунктирная линия), поле, рассчитанное с помощью вычитания полей (тонкая линия).*
На рис. а) изображён полный график, на рис. б) выделен сектор от 70º до 90º.

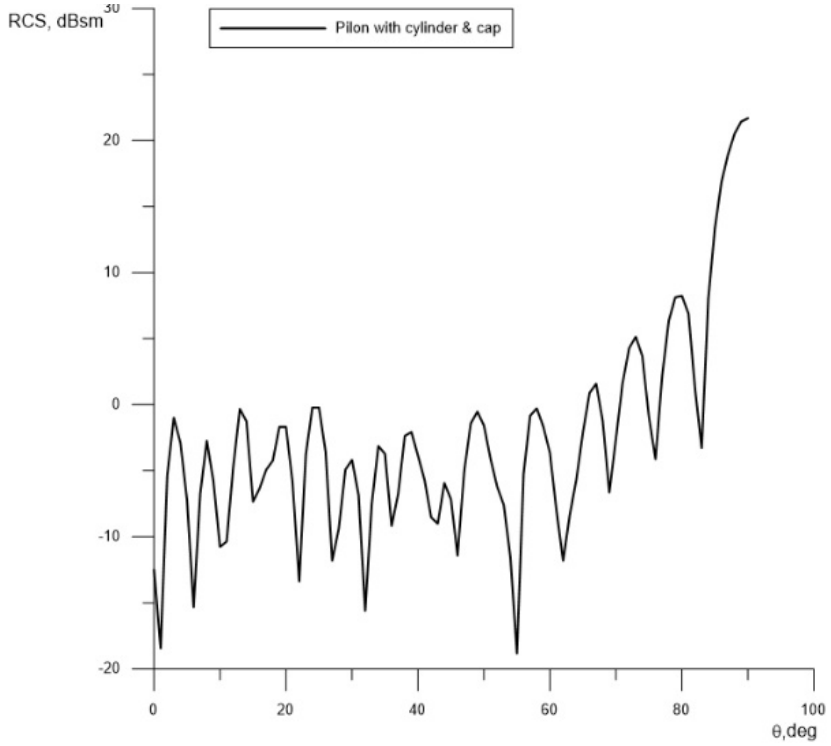


Рис. 3. *Математическое моделирование проводится в приближении дальней зоны с использованием программного комплекса AltairFEKO, который позволяет с высокой точностью получать значения дифрагированного поля.*

Но при этом вычитании невозможно учесть переотражения поля между опорой и объектом. Чтобы уменьшить переотражения между объектом и пилоном, между ними размещается экран из радиопоглощающего материала.

В данной работе рассматриваются конструкции как без защитного экрана, так и с защитным экраном, размещённым между объектом и верхней горизонтальной границей пилона. На пилон, имеющий в сечении форму, оживала и наклонённый под углом 60° к поверхности пола, падает плоская электромагнитная волна. Электрическая составляющая напряжённости поля поляризована в вертикальной плоскости. Сам пилон является идеально проводящим. В качестве исследуемого объекта используется круглый цилиндр конечной высоты. Рассматриваются частоты от 1ГГц до 2ГГц. Рассчитывается рассеянное на пилоне с объектом поле при падении на объект плоской волны. На рисунке 2 представлены графики рассеянного поля пилона без объекта, поле с объектом и поле после вычитания поля опоры, полученные методами математического моделирования.

Далее рассматривается структура с защитным экраном, размещённым между объектом и пилоном. Защитный экран (рис.1b) представляет собой достаточно тонкий плоский слой диэлектрика с границей в виде эллипса, направление большой оси которого совпадает с направлением падения плоской волны. В результате полученное поле структуры пилон-объект-экран представлено на рисунке 3, при азимутальном угле 180°, где по оси абсцисс отложен угол Ѳ от оси OZ, по оси ординат ЭПР структуры, выраженной в децибелах.

Список литературы

1. Penghui Chen “Comparison of Methods to Extract Target Scattering from Scattering of Target-Metal Pylon Combination” School of Electronic and Information Engineering Beihang University, Beijing, China
2. БалабухаН.П.“Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов”, Наука 2007г.
3. Л.Д. Гольдштейн, Н.В.Зернов“Электромагнитные поля и волны”, Сов. радио 1965г.

INVESTIGATION OF THE OBJECT SUPPORT INFLUENCE ON ELECTROMAGNETIC FIELD SCATTERED BY THE OBJECT

Student Evstafev E.E.[1], Cand. Sci. (Phys.-Math) Shapkina N.E.[1,2], Cand. Sci. (Tech) Balabukha N.P[2]

[1] M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics
[2] Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics of the Russian Academy of Sciences (ITAE RAS)
egorezbalka@gmail.com

When the scattering of electromagnetic waves is measured, the object under study is often placed on a metal support, the scattered field of which distorts the field of the object. In this paper the effect of the support in the absence and in the presence of an additional protective screen was analyzed. A round cylinder is considered as a modeled object. The scattering of the field on the structures of the object-pylon and the object-screen-pylon for frequencies from 1 GHz to 2 GHz is calculated.

Keywords: scattered electromagnetic field, pylon, mathematical modeling.

АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ В РУПОРНЫХ БЕЗЭХОВЫХ КАМЕРАХ

Кузьмич Т.А.[1], к.ф.-м.н. Шапкина Н.Е. [1,2], к. т. н. Балабуха Н.П.[2], Меньших Н.Л.[2]

[1]МГУ им. М.В.Ломоносова
[2]ИТПЭ РАН
kuzmich.ta16@physics.msu.ru

Для изучения рассеивающих свойств объектов при частотах менее 500 МГц используются рупорные безэховые камеры пирамидальной или конической формы. В работе построена и проанализирована математическая модель конической безэховой камеры с цилиндрическим продолжением и пирамидальной с продолжением в виде параллелепипеда. На первом этапе стенки камер считаются идеально проводящими, а в качестве источника излучения используется электрический диполь. Произведен сравнительный анализ полей при изначальном положении источников на двух частотах. Далее была решена задача оптимизации положения источника для получения наилучшего распределения поля в рабочей зоне.

Ключевые слова: математическое моделирование, рупорная безэховая камера, радиопоглощающий материал

Введение

При проведении измерений рассеивающий свойств объектов на открытых полигонах влияние погодных условий приводит к заметному увеличению ошибки измерений. В таких случаях эффективным средством проведения измерений является компактный радиоизмерительный полигон, так как все измерения проходят в закрытом помещении - безэховой камере.

Целью создания БЭК является формирование рабочей зоны - объёма, в котором объект будет позиционироваться как в свободном пространстве. В рабочей зоне безэховой камеры формируется электромагнитное поле квазиплоской волны.

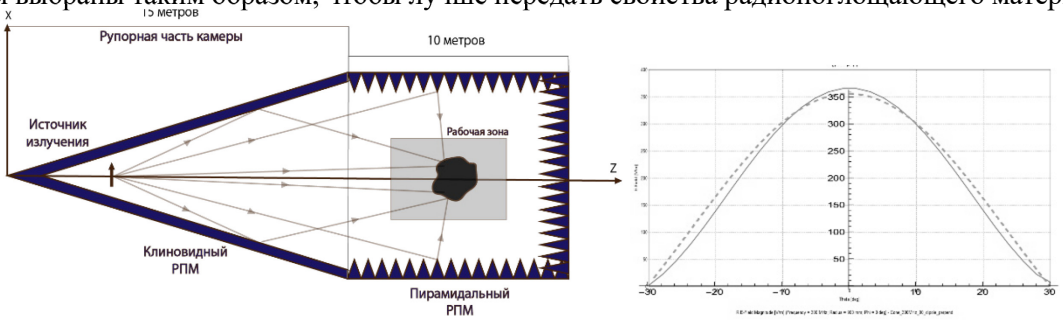
1. Постановка задачи и построение модели БЭК

Низкочастотные полигоны представляют собой рупорную безэховую камеру (РБЭК): металлическую конструкцию, состоящую из волновода переменного сечения с открытым излучающим концом и примыкающей части постоянного сечения, где формируется рабочая зона (рис.1а). Длина конической части исследуемой конической камеры составляет 15м, а длина цилиндрического продолжения - 10 м, радиус основания конуса - 5.4 м. Рупорная пирамидальная камера с квадратом в основании имеет такие параметры, чтобы угол раскрыва и площадь поперечного сечения в раскрыве рупора совпадали с аналогичными параметрами конической РБЭК.

В качестве источника для обеих камер используется электрический диполь, расположенный на оси симметрии камеры перпендикулярно ей. Частоты излучения – 300 МГц и 800 МГц соответствуют рабочим частотам основных используемых антенн. Источник изначально располагается на расстоянии 3λ.

В случае описанных структур сложной формы для расчета поля используется численное решение уравнений Максвелла, в частности, методом интегральных уравнений. Показано, что для полубесконечной БЭК с идеально проводящими стенками результаты, полученные аналитически с помощью решения с использованием пакета FEKO, находятся в хорошем соответствии (рис. 1б)

Для получения лучшего распределения электромагнитного поля стенки безэховой камеры покрывают радиопоглощающим материалом. Рассматривается модель камеры, стенки которой покрыты диэлектриком толщиной d=300 мм с диэлектрической проницаемостью ε=1,512+i 1,23; параметры покрытия выбраны таким образом, чтобы лучше передать свойства радиопоглощающего материала.

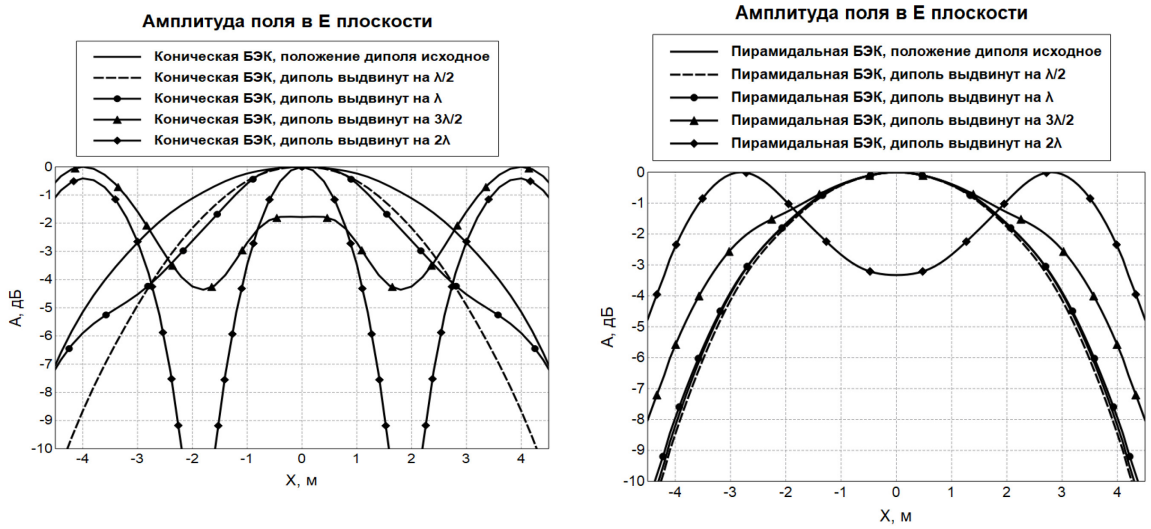


а) б)

Рис. 1. *Схема рупорных БЭК (а), сравнение результатов численного и аналитического анализа (б) (Пример конической камеры).*

2. Сравнительный анализ формирования поля в пирамидальной и конической камерах при выдвижении источника

На характер поля в апертуре камеры оказывает существенное влияние расположение источника относительно вершины, исследовано поведение при выдвижении источника до 5λ.
Две камеры, имеющие близкие распределения полей при исходном положении источника, формируют также похожие по структуре распределения поля при выдвинутом положении источника. В обеих камерах при выдвижении источника вперед возникают дополнительные максимумы распределения амплитуды (рис. 2). Однако в конической камере возникают три максимума уже при выдвижении источника на длину волны, в то время как в пирамидальной два боковых пика при перемещении на 2 длины волны.
В распределении фазы при выдвижении источника излучения на расстояние больше длины волны формируется четкая дифракционная картина с несколькими максимумами и минимумами. Следовательно, дальнейшее движение источника по направлению от устья камеры не имеет смысла. С помощью такого анализа сокращается промежуток значений удаления источника излучения от вершины конуса, при котором распределение поля будет иметь наилучшие амплитудно-фазовые характеристики.



а) б)

Рис. 2. *Сравнение распределений амплитуды поля рабочей зоне конической БЭК (а), и пирамидальной БЭК (б).*

3. Решение задачи оптимизации

Исходя из полученных характеристик полей в рабочей зоне камеры можно рассчитать оптимальное расположение диполя на оси камеры конического типа. В данной работе рассматривается одномерная оптимизация. Оптимальным будем считать положение источника, при котором максимальна сумма квадратов линейных размеров d рабочей зоны в E и H плоскостях в распределениях амплитуды и фазы. В силу того, что вычисления электромагнитного поля внутри конической рупорной камеры требуют больших вычислительных ресурсов, необходимо использовать метод оптимизации с заранее известным конечным числом итераций. Одним из таких методов решения однопараметрических задач является метод Фибоначчи. Он теоретически обладает наилучшей среди методов исключения отрезков стратегией и применяется для численного поиска безусловного экстремума. Требуется найти точку максимума r_0 для целевой функции $\Phi(r_0)$ на заданном интервале:

$$\Phi(r_0) = |d^E_{Amp}|^2 + |d^H_{Amp}|^2 + |d^E_{Phase}|^2 + |d^H_{Phase}|^2 . \quad (1)$$

Для уменьшения интервала неопределенности необходимо произвести анализ функции как минимум в двух точках для первой итерации и в одной для следующих, то есть нужно k + 1 вычисление целевой функции. В результате вычислений за k=7 итераций интервал сузился от [1.65; 1.8] м до [1.713; 1.722] м. Погрешность метода определяется как ε=0.004м.

Выводы

Поставлена задача распространения электромагнитного поля в рупорных безэховых камерах. Исследовано изменение диаграммы направленности при покрытии стенок БЭК радиопоглощающим материалом при различных положениях источника. Также установлено, что переотражение источника начинает оказывать существенное влияния на распределение амплитуды поля при его выдвижении на λ для конической и на 2λ для пирамидальной камер. С помощью минимизации функционала от положения источника излучения было найдено расположение диполя на оси камеры, при котором рассчитанное распределение поля имело наилучшие амплитудно - фазовые характеристики.

Список литературы

1. W. Emerson и H. Sefton, “An improved design for indoor ranges”, Proceedings of the IEEE, т. 53, No 8, с. 1079-1081, 1965
2. V. Rodriguez, “A cone shaped taper anechoic chamber for antenna measurements in the 200 MHz to 18GHz frequency range”, в Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, IEEE, 2012,с. 1-2.
3. K.-h. Lee, C.-C. Chen и R. Lee, “Novel dual-polarized tapered-chamber feed design concepts” ,IEEE Antennas and Propagation Magazine, т. 47,No 4, с. 214-218, 2005
4. T. Kuzmich, “Mathematical Modelling of Cone Shaped Tapered Anechoic Chamber”, в Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (June 24-28, 2019, Divnomorskoe, Russia).
5. Кузьмич Т.А., Шапкина Н.Е., Балабуха Н.П, “Исследование конической безэховой камеры методами математического моделирования”, ARMIMP-2019.

ANALYSIS OF THE OPTIMAL LOCATION OF THE RADIATION SOURCE IN TAPERED ANECHOIC CHAMBERS

Kuzmich T.A.[1], Cand. Sci. (Phys.-Math) Shapkina N.,E.[1],
Cand. Sci. (Phys.-Math) Balabukha N.P.[2], Menshikh N.L.[2]

[1]Lomonosov Moscow State University
[2]Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics RAS
kuzmich.ta16@physics.msu.ru

For measuring the scattering properties of objects at frequencies less than 500 MHz, tapered horn anechoic chambers of a pyramidal or conical shape are used. In this work, a mathematical models of a conical anechoic chamber with a cylindrical continuation and a pyramidal one with a continuation in the form of a parallelepiped are modeled and analyzed. At the first stage, the walls of the chambers are considered to be perfectly conducting, and an electric dipole is used as a radiation source. A comparative analysis of the fields for the initial position of the sources at two frequencies has been carried out. Next, the problem of optimizing the position of the source was solved to obtain the best field distribution in the quiet zone.

Keywords: mathematical modeling, anechoic chamber, radio absorbing material

ГРУБЫЕ СТАТИСТИКИ В РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКЕ СИГНАЛОВ ПО ЧАСТОТЕ И ПЕЛЕНГУ В СИСТЕМАХ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Аспирант, Силаев С.А.[2], Профессор, д.т.н., Горбунов Ю.Н.[1,2]

[1]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Фрязинский филиал (ФИРЭ), [2]Российский технологический университет радиотехники, электроники и автоматики (РТУ МИРЭА)
silaevsa708@gmail.com

Рассматривается стохастический подход к построению радиоканалов систем непосредственной радиотехнической разведки. Формирование стохастических дискриминационных характеристик для линеаризации приёмных трактов, устранение эффектов «растекания» энергии на границах каналов (элементов) дискретности при цифровой обработке базируется на концепции введения в радиоканалы цифровой обработки сигналов искусственной стохастичности, предполагающей наряду с естественной стохастичностью, обусловленной случайной природой входных сигналов, рандомизацию условий процесса «приёма – измерения».

Ключевые слова: рандомизация, многоканальность, растекание энергии, многосигнальные режимы, стохастическое дискретизация и квантование, грубые статистики, амплитудное ограничение, линеаризация приёмных трактов

Введение

В работе анализируются линеаризация тракта ЦО с грубыми статистиками, уменьшение инструментальных погрешностей многоканальных измерителей пеленга, частоты и фазы в РЛС с ФАР, осуществляющих (в каналах) усреднение (сглаживание) грубых ЦО по методу Монте –Карло и позволяющих за счёт рандомизации уменьшить число уровней амплитудного, частотного, фазового и пространственно - частотного квантования на входе и процессорах ЦО (DSP), сократить число элементов ФАР – каналов приёмного устройства, а также уменьшить токи потребления.

При непосредственной (быстрой) РТР, стремление получить мгновенные оценки частоты и пеленга РЛС не всегда технически просто осуществимо, т.к. ресурсы времени и аппаратный ограничены. Одна из важных тенденций развития современных систем РТР с целью повышения качества информации в разведываемом поле радиосигналов и уменьшения времени ответной реакции для радиопротиводействия – переход к многоканальным системам РТР.

Целью данной статья является определение перспектив применения радиоканалов в системах с малоэлементными ФАР (ограниченной канальностью РПУ) системы ЦО с рандомизацией (введение стохастических каналов), линеаризирующей тракт ЦО в многосигнальных режимах работы и на границах раздела литеров (по частоте, пеленгу и фазе) систем РТР.

Наращивание апертуры окна пространственных выборок. Структурная схема обобщенного DSP, реализующего технологию релеевского разрешения показана на рис. 1, где M, N – числапространственных и «временных» каналов по круговой частоте ω = 2πf, f – обычная частота). $\tilde{\dot{S}}(\omega, \Omega_\alpha, \Omega_\beta)$ – спектральная плотность (распределение) мощности, Ω_α, Ω_β - пространственные частоты в апертуре ФАР по азимуту α и углу места β.

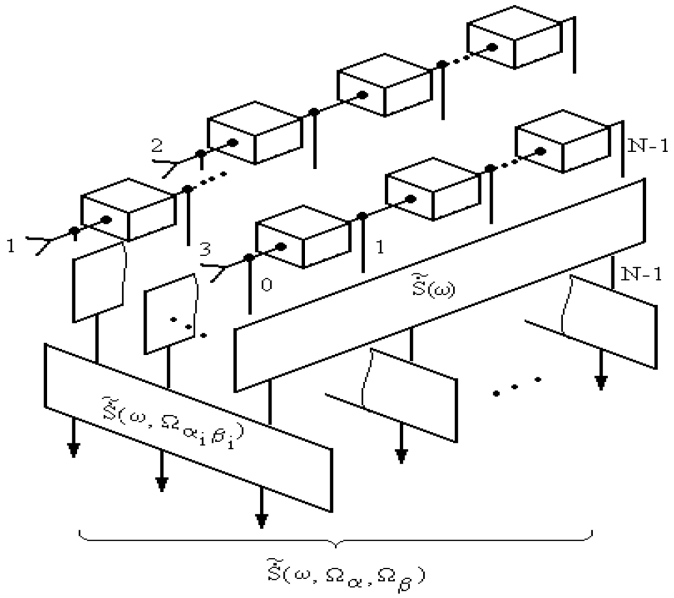


Рис. 1. *Формирование оценок СПМ $\tilde{\dot{S}}(\omega, \Omega_\alpha, \Omega_\beta)$ в процессоре DRFM-S (M=3).*

Стохастическая частотометрия и пеленгация

В [2] проанализировано построение системы обработки и формирования сигналов РЛС для космических аппаратов, в которых учитываются технические аппаратурные ограничения и ограничения ресурсов ЦО. Для реализации этого применяется последовательное диаграммо-образование на базе усечённых (малоэлементных) апертур и робастных статистик сигнала на входе грубых («булевых», «бинарно-знаковых») отсчетов сигнала. Для достижения преимуществ предлагается нетрадиционный подход, предполагающий в процессе адаптивного формирования результирующей многолучевой (многосегментной) диаграммы направленности ФАР осуществлять поэтапную стохастическую модуляцию положения фазового центра путём активизации малого числа передающих слабонаправленных элементов и использования ГС [2].

Также для уменьшения потребления токов предлагается использовать в качестве обработки сигналов, модульный сумматор, вместо сумматора, содержащего нелинейные операции, в случае использования одной квадратуру (когда K=1). Такая подстановка приведёт к потерям помехоустойчивости, но за счёт использования стохастического подхода, эти потери будут значительно уменьшены.

Модель амплитудного тракта с бинарно – знаковым квантованием сигнала в квадратурах приведена на рис. 2. Анализ модели проведён в [3,4].

Моделирование и экспериментальные исследования

В ходе исследований возникли задачи, которые до конца не были решены аналитически. Моделированию были подвергнуты процедуры малоразрядного квантования сигналов в АЦП - «стохастического компаратора», осуществляющего бинарно-знаковое квантование типа $sign\{\cdot\}$ с рандомизацией ГС, а также было проделано моделирование модульного сумматора (К=1), и оценены потери без и с использованием рандомизации.

Выбор метода моделирования

В основу проводимого в настоящей работе моделирования положена следующая методика:

1) Входная сигнально-помеховая модель представляется суммой гармонических сигналов, зашумленных гауссовым шумом и гауссовыми помехами с нулевым средним. Шум моделируется как «белый», а пассивная помеха – «цветная».
2) Задается алгоритм обработки сигналов, конкретизируются его параметры и выявляются условия иерархического объединения с другими моделями.
3) Фиксируется среднестатистический результат на выходе системы обработки в виде моментов $M_2\{\cdot\}$, $M_1\{\cdot\}$, дисперсии $D = M_2 - M_1^2$, при этом мощность полезного сигнала $P_{Sвых}$, учитывающая нелинейные эффекты дискретизации и квантования определялась по методике Бреннана и Рида, с использованием «мощностных критериев – коэффициентов подавления, улучшения и подпомеховой видимости и СКО [1].
4) Строятся функциональные зависимости (линии или поверхности) влияния частных параметров на показатели спектральной эффективности.

Размер выборок усреднения выбирается достаточным для того, чтобы выборочные моменты (средние, среднеквадратические, дисперсии и т.д.) были близки с допустимой точностью приближения к истинным моментам, соответствующих параметрам модели.

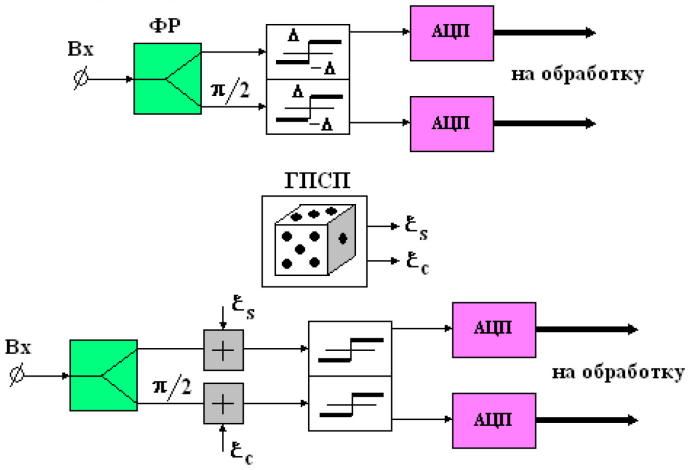


Рис. 2. *Модель обрабатывающего тракта с ограничением сигналов.*

Моделирование частотомеров и пеленгаторов

Дан анализ решения задачи и выявлены инструментальные возможности измерения частоты, пеленга и фазы в классическом варианте релеевского разрешения. При моделировании частотомеров и пеленгаторов важно получить количественные данные по СКО измерения частот (временных и пространственных), так и сопоставить их с потенциально возможными, чтобы определить эффективность измерений. В качестве метода измерения взят моноимпульсный метод оценки, а в качестве конкретного способа - способ «фрактальной суммарно-разностной обработки» на оси обычных ω и пространственных Ω частот. Выявлялась пара смежных i, i+1 каналов и образовывались суммарные y_{Σ} и разностные y_{Δ} каналы. Оценка ω^* частоты ω (или оценка Ω^* пространственной частоты Ω) осуществлялась выявлением отклонения измеряемого параметра относительно «равносигнального». Обнаружение (в линейных «бинах» и объёмных «тринах», см. рис. 5)проводилось по суммарному каналу.

В качестве целевой функции для последующего анализа были исследованы функциональные зависимости СКО от отношения «сигнал/шум» q_0^2. Параметрами моделирования выступали: разрядность K входного АЦП, размеры N, M и L окон временных и пространственных выборок. Рассмотрение параметров K, N, M и L в качестве аргументов функций СКО для заданного значения q_0^2 позволило получить исходные данные для проверки сходимости принципа «удлиняющейся», либо «повторяющейся» серии.

Начальный участок амплитудной характеристики АЦП выбран аналогичным характеристике $sign\{\cdot\}$, соответствующей случаю K=1, что позволило при моделировании осуществить переход к другим значениям K>1 для семейств амплитудных характеристик АЦП с «безлюфтовой зоной нечувствительности» начальных участков.

Анализ результатов моделирования

При анализе метода многолучевой частотометрии и пеленгации на основе суммарно-разностной обработки “парциальных пар лучей” в широкополосных и широкоугольных ФАР достигнута асимптотическая линейность дискриминационных характеристик с уменьшаемыми в зависимости от отношения сигнал-шум и размеров окон наблюдения погрешностями их воспроизведения. Функциональные зависимости СКО σ^2 измерения частот ω и Ω в функции от q_0 отражали общую закономерность повышения эффективности (точности) измерения при увеличении q_0^2. Количественные характеристики достигнутой точности измерения позволили обеспечить проектирование соответствующих систем обработки с одиночными измерениями (N=M=L=1). При необходимости учета размеров N, M, L временных N и пространственных M, L выборок использованы соответствующие зависимости перехода от пространственных частот Ω к пеленгу Θ.

Сравнение полученных результатов показало несущественное снижение потенциально достижимых характеристик по неравенству Рао – Крамера.

Заключение. Определены перспективы применения радиоканалов в системах с малоэлементными ФАР (ограниченной канальности РПУ) системы ЦО с рандомизацией (введения стохастических каналов), которая линеаризует тракт ЦО в многосигнальных режимах работы и на границах раздела литеров систем РТР (по частоте и пеленгу). Проведён анализ РО по критериям «подавления», «улучшения», которые позволили получить количественные значения прироста этой эффективности в зависимости от решаемой задачи. В частности – рандомизация ПВ-фильтрации обеспечивала совместимость использования таких ПВ-ресурсов как порядок r - режекторного фильтра, число N когерентно накапливаемых (суммируемых) импульсов (отсчётов), числоM, L-пространственных каналов, используемых для нивелирования эффектов дискретизации и шумов квантования обычной обработки. Из-за наличия элементов случайности и худших результатов классификации по сравнению с байесовским правилом использовать Р-правила на первый взгляд не имеет смысла. Однако данное правило и подобные ему представляют значительный интерес при работе с ГС и в условиях отсутствия априорных сведений о помехах и упрощении приёмных трактов из-за аппаратных и ресурсных ограничений. Характеристики вводимого шума (в отличие от внешнего и собственного шума приёмника) всегда известны и могут быть учтены.

Список литературы

1. Горбунов Ю.Н., Куликов Г.В., Шпак А.В.Радиолокация: стохастический подход. Монография. М.: Горячая линия - Телеком, 2016, 576с.
2. Горбунов Ю.Н. Стохастическая интерполяция пеленга в адаптивных антенных решетках с последовательным диаграммо-образованием на базе усечённых (малоэлементных) апертур и робастных статистик сигнала на входе // Издательство «Радиотехника», Журнал «Антенны», 2015, №6, с. 18-26.
3. Горбунов Ю.Н. Рандомизация условий приёма и формирования сигналов в многоканальных доплеровских информационных системах с амплитудным ограничением // В кн.: Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – REDS-2014». – М.: 2015. с. 144 – 147.
4. Горбунов Ю.Н.О возможности уменьшения числа уровней квантования вцифровых фильтрах СДЦ путем применения рандомизированных алгоритмов. // Радиотехника. - 1983, № 6. - с. 45 – 47.
5. Радзиевский В.Г. Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. – М.: Радиотехника, 2004.
6. Сычёв М.Н. Пространственно – временная обработка сигналов па основе параметрического спектрального анализа. – Антенны, 2001, вып.1 (47).

ROUGH STATISTICS IN RADIO ENGINEERING SIGNALS ON FREQUENCY AND DIRECTION IN PASSIVE RADAR SYSTEMS

Professor, doctor of technical sciences, Gorbunov Yu. N.[1,2] , Post-graduate, Silaev S.A.[2]

[1]Institute of Radio Engineering and Electronics. V.A. Kotel'nikov RAS, Moscow, Fryazino branch (FIRE), [2]Russian State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automation

silaevsa708@gmail.com

A stochastic approach to the construction of radio channels for electronic intelligence systems is considered. Formation of stochastic discriminatory characteristics for linearization when detecting tractors, elimination of the consequences of "growing" energy at the border of channels (elements) is based on the principles of radical digital conditions of the "reception - measurement" process.

Keywords: randomization, multichannel, energy spreading, multi-signal modes, stochastic sampling and quantization, rough statistics, amplitude limitation, linearization of the receiving paths

О ФРАКТАЛЬНОЙ ПРИРОДЕ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

г.н.с., д.ф.м.н., Петров Н.И. [1], Петрова Г.Н.

[1]Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
petrovni@mail.ru

Фрактальный метод используется для описания искривлений и ветвлений траектории распространения молниевого разряда. В частности, мы используем эту модель при расчёте вероятности попадания молнии в реальные объекты. Показано сильное влияние полярности молнии на вероятность поражения заземленных объектов.

Ключевые слова: молниевый разряд, искривление и ветвление канала, фрактальная размерность, полярность молнии

Введение

Одним из главных свойств молниевого разряда является случайный характер траектории его распространения в пространстве. Траектория лидера молнии имеет сложную структуру, где искривления и ветвления главного канала не совпадают с линиями электрического поля. Это свойство является одной из главных причин разброса напряжения пробоя в разрядных промежутках и ориентировки канала лидера в пространстве. Продвижение лидера молнии от облака к земле не зависит от структуры поверхности земли до тех пор, пока он не входит в «область стягивания» наземных объектов [1]. Поэтому, при анализе механизма молниевого удара, развитие лидера молнии до этого момента обычно не рассматривается. Однако расстояние поражения для молниевого разряда с конкретным зарядом на единицу длины канала (либо током обратного удара) может отличаться от случая к случаю. Это может происходить из-за изменений усиления электрического поля вблизи объектов, вызванных разбросом геометрических параметров молниевого разряда.

1. Искривление и ветвление траектории молнии: фрактальная модель

Распространение лидерного разряда рассматривается как дискретный процесс [2-4]. Величины для электрических полей были получены из экспериментальных измерений в длинных воздушных разрядных промежутках [5]. На разрядный промежуток накладывается прямоугольная координатная сетка, со стороной квадрата равной длине ступени лидера $l_{ст}$. Потенциал точки координатной сетки, пройденной разрядом, устанавливается равным U_0 минус падение напряжения в канале лидера. Оно определяется напряжённостью электрического поля в канале $E_к$ и длиной канала. Вероятность пробоя ступени пропорциональна локальному электрическому полю в области фронта в степени η:

$$p \sim E^{\eta} \tag{1}$$

где $\eta > 0$.

На каждой ступени развития разряда потенциалы в узлах решётки U_{ijk} вычисляются из уравнения Лапласа $\nabla \boldsymbol{U} = \mathbf{0}$ методом итераций. Расчёт продолжается до того момента, когда вероятность развития разряда во всех направлениях становится равной нулю.

Фрактальная размерность D определяется как отношение полной длины всех элементов разряда в сфере радиуса R к радиусу R, а именно:

$$L(R) \sim \int \rho(r) r^{(d-1)} dr \sim R^D \tag{2}$$

где d – размерность пространства. Откуда следует, что плотность объёмного заряда равна:

$$\rho(R) \sim r^{-(d-D)} \tag{3}$$

Влияние начальных условий на траектории разряда исследовались в [4, 6, 7]. Эти исследования показывают, что уровень искривлённости и разветвлённости канала разряда и его фрактальная размерность увеличиваются с возрастанием потенциала головки лидера.

2. Влияние полярности молнии

Полярность разряда существенно влияет на ориентировку лидера на объекты. Это обусловлено различием критических электрических полей, необходимых для распространения положительных и отрицательных лидеров.

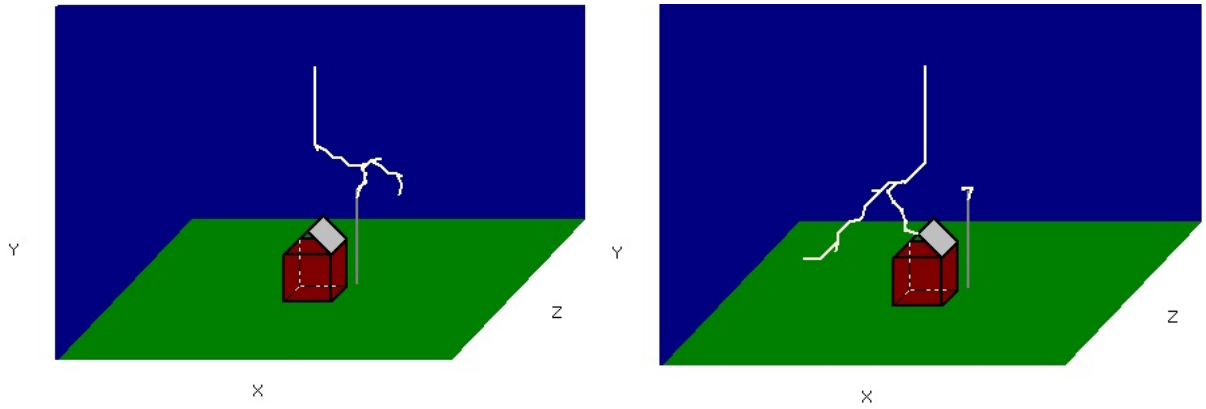
2.1. Отрицательная полярность

Ниже представлены результаты моделирования траекторий ориентировки молнии на двускатную конструкцию, защищенную громоотводом.

На рис. 1 представлены трехмерные траектории отрицательных нисходящих разрядов. Из расчетов следует, что эффективность громоотводов против отрицательной молнии выше, чем при положительной полярности.

2.2. Положительная полярность

Из расчетов следует, что отрицательные удары молнии в углы и близлежащие вертикальные и горизонтальные края конструкций составляют более 90% всех ударов. Это указывает на то, что точки на структуре с наибольшей степенью усиления электрического поля гораздо более вероятно будут поражены. Однако наши исследования по фрактальному моделированию показывают, что вероятность удара в заданную точку на структуре также зависит от полярности удара молнии.



(а) (б)

Рис. 1. *(а) Отрицательный нисходящий лидер захватывается восходящим положительным лидером, инициированным от громоотвода. (б) Отрицательный нисходящий лидер захватывается положительным восходящим лидером, инициированным из угла объекта.*

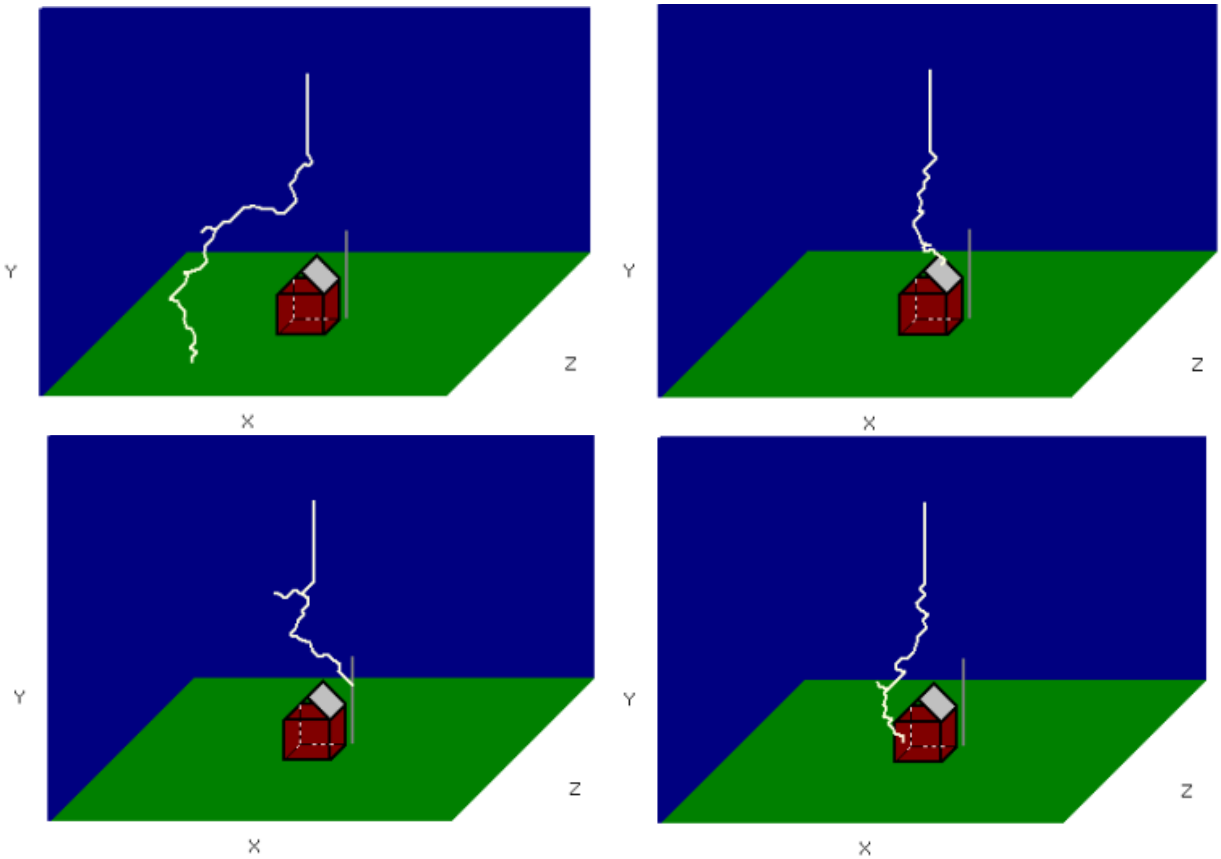


Рис. 2. *Траектории молний положительной полярности.*

Расположение точек поражения на объекте сильно зависит от структуры его поверхности и полярности молнии. Отрицательная молния преимущественно ориентируется на точки максимального усиления электрического поля, тогда как распределение точек поражения положительной молнией носит более случайный характер. Вероятность прорыва молнии на защищаемый объект в 3 – 5 раз выше для положительной полярности по сравнению с отрицательной полярностью.

Выводы

На основе проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

- Для любого объекта вероятность перехвата выше для отрицательной молнии по сравнению с положительной молнией.
- Геометрия объекта является важным параметром – расчёты показывают, что вероятность перехвата молнии протяжённым трёхмерным объектом может быть до 40% больше, чем вытянутой конструкцией (молниеотводом) той же высоты.
- Высокие строения обеспечивают существенную защиту близлежащих более низких построек от отрицательной молнии. Вероятность их поражения может уменьшиться в четыре раза.
- Вероятность боковых ударов в высокие строения очень мала, порядка 2%, и незначительно растёт с увеличением высоты. Большинство боковых ударов приходятся на положительную молнию, которая, в отличие от отрицательной молнии, может поражать точки по всей поверхности объекта.
- Предлагаемые международными стандартами по молниезащите руководства по выбору защитных углов для объектов нуждаются в пересмотре с целью учёта в них статистической природы молнии и её полярности, так как они сильно влияют на эффективность перехвата в молниезащитных системах.

В течение многих лет основные принципы молниезащиты полностью основывались на электро-геометрических моделях, игнорируя эффекты, связанные со статистической природой молнии [8]. С другой стороны, используя представленную в данной работе фрактальную модель, можно определять эффективность стягивания или защитный уровень для любой реальной конструкции. Этот подход принимает во внимание все важные физические свойства молнии, такие как: параметры молнии и условия возникновения встречного лидера. И самое главное, он учитывает случайные характеристики – искривление и ветвление канала молнии. Предлагаемый метод представляет практический интерес также для определения вероятностей поражения летательных аппаратов [9].

Список литературы

1. Uman, M.A., 1987, Lightning Discharge, Academic Press, New York.
2. Петров Н.И., Петрова Г.Н. Моделирование молниепоражаемости изолированных и заземленных объектов // Письма в ЖТФ. 1993. Т.19. В.6. С.25-29.
3. Петров Н.И., Петрова Г.Н. Физические механизмы формирования внутриоблачных разрядов молнии.// ЖТФ.-1993.-Т.63.-В.4.-С.41-49.
4. Петров Н.И., Петрова Г.Н. Математическое моделирование траектории лидерного разряда и молниепоражаемости изолированных и заземленных объектов // ЖТФ. 1995. Т.65. В.5. С.41-58.
5. Петров Н.И., Аванский В.Р., Бомбенкова Н.В. Измерение напряженности электрического поля в стримерной зоне и чехле канала лидерного разряда. // ЖТФ. 1994. Т.64. В.6. С.50-60.
6. Петров Н.И., Петрова Г.Н. Физические механизмы формирования молниевых разрядов
7. между грозовым облаком и ионосферой // ЖТФ. 1999. Т.69. В.4. С.134-137.
8. Petrov N.I., Petrova G.N., D'Alessandro F. Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2003. V. 10(4). P. 641-654.
9. Petrov N.I., and D'Alessandro F. Verification of lightning strike incidence as a Poisson process. // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 2002. V.64. 1645-1650.
10. Petrov N.I., Haddad A., Petrova G.N., Griffiths H. and Waters R.T. Study of effects of lightning strikes to an aircraft // Recent Advances in Aircraft Technology, Ed. R.K. Agarwal. 2012. Chapter 22. P. 523-544.

ON FRACTAL NATURE OF LIGHTNING DISCHARGES

chief scientist, DSc, Petrov N.I., Petrova G.N.

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS
petrovni@mail.ru

The fractal method is used to describe the bending and branching of the lightning discharge trajectory. In particular, we use this model to calculate the probability of lightning strikes to real objects. The strong influence of lightning polarity on the probability of strokes to grounded objects is shown.

Key words: lightning discharge, channel bending and branching, fractal dimension, lightning polarity

ДРОБНО-РАЦИОНАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ КВАДРАТОВ АТОМАРНЫХ ФУНКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ФОРМУЛЫ КОШИ

м.н.с. Будунова К.А.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
1917schw@mail.ru

В работе обсуждается впервые построенный в этом году метод дробно-рациональной аппроксимации квадратов атомарных функций. Необходимость в данных аппроксимациях возникает при построении как аналоговых, так и цифровых атомарных фильтров с бесконечной импульсной характеристикой. Метод основан на представлении частичных сумм Фурье квадратов атомарных функций с помощью формулы Коши и, далее, аппроксимации интеграла по формуле прямоугольников. Погрешность приближения построенными таким образом рациональными дробями может быть минимизирована относительно параметров контура интегрирования и числа слагаемых частичной суммы.

Ключевые слова: атомарные функции, дробно-рациональная аппроксимация, фильтры низких частот.

Введение

В работе обсуждается построенный в этом году метод дробно-рациональной аппроксимации квадратов атомарных функций. Потребность в решении данной задачи возникает при попытке синтеза аналогового фильтра низких частот с АЧХ, аппроксимирующей атомарную функцию. К задаче синтеза аналогового прототипа сводится также процесс построения цифровых фильтров с бесконечной импульсной характеристикой. Два первых метода аппроксимации рациональными дробями сплайнов и атомарных функций впервые были представлены в работе [1], однако они были слишком громоздкими для практического применения. Описанный здесь метод является более перспективным и позволяет строить дробно-рациональные приближения сравнительно малых порядков.

Описание метода

Рассмотрим нормированную относительно носителя атомарную функцию $\mathrm{h}_a\left(\frac{\omega}{a-1}\right)$ [2,3], обращающуюся в ноль вне отрезка $[-1,1]$. Ее разложение в ряд Фурье имеет вид

$$\mathrm{h}_a\left(\frac{\omega}{a-1}\right) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(\pi k \omega) \tag{1}$$

В формуле (1) a_k – коэффициенты,

$$a_0 = (a-1)/2,\ a_k = (a-1)F_a((a-1)\pi k), \tag{2}$$

а $F_a(t)$ – спектр атомарной функции $\mathrm{h}_a(x)$,

$$F_a(t) = \prod_{s=1}^{\infty} \mathrm{sinc}\left(\frac{t}{a^s}\right).$$

Положим $\varphi_a(\omega) = \mathrm{h}_a^2\left(\frac{\omega}{a-1}\right)$. Ряд Фурье для $\varphi_a(\omega)$ определяется формулой

$$\varphi_a(\omega) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(\pi k \omega), \tag{3}$$

где c_k связаны с коэффициентами (2) соотношениями

$$c_0 = \frac{a_0^2}{2} + \sum_{l=0}^{+\infty} \frac{1}{2} a_l^2,$$

$$c_k = \sum_{l=0}^{k} \frac{1}{2} a_{k-l} a_l + \sum_{l=k+1}^{+\infty} a_{l-k} a_l,\ \ k \geq 1.$$

Частичные суммы $\varphi_a^{(M)}(z)$ ряда (3)

$$\varphi_a^{(M)}(z) = c_0 + \sum_{k=1}^{M-1} c_k \cos(\pi k z) \tag{4}$$

являются целыми функциями. Воспользуемся формулой Коши. Пусть ω – вещественная переменная, C – контур, ограничивающий односвязную область D комплексной плоскости $\mathbb{C}$ и проходящий через точки $z=\pm 1$, а область D содержит интервал $(-1,1)$. Тогда из формулы Коши следует равенство

$$\frac{1}{2\pi j}\oint_C \frac{\varphi_a(z)dz}{z-\omega}=\begin{cases}\varphi_a(\omega), |\omega|<1,\\ 0, |\omega|>1.\end{cases}$$

Далее для получения искомой дробно-рациональной аппроксимации можно использовать формулы приближенного интегрирования. Так, для заданного уравнением $z=z(t)$ контура C согласно формуле прямоугольников для сетки $t_0,...,t_{N-1}$ с шагом Δt

$$\frac{1}{2\pi j}\oint_C \frac{\varphi_a^{(M)}(z)dz}{z-\omega}\approx\frac{1}{2\pi j}\sum_{l=0}^{N-1}\frac{\varphi_a^{(M)}(z(t_l))z'(t_l)\Delta t}{z(t_l)-\omega}. \quad (5)$$

Правая часть соотношения (5) является суммой N элементарных комплексных дробей, то есть рациональной дробью со знаменателем порядка N и числителем порядка $N_0<N$.

Ясно, что при фиксированном контуре для заданного M можно получить функцию $\varphi_a^{(M)}(\omega)$ с любой точностью, увеличивая N в (5). Кроме того, частичные суммы (4) достаточно быстро сходятся к функции $\varphi_a(\omega)$. Поэтому при достаточно больших M и N

$$\varphi_a(\omega)\approx\frac{1}{2\pi j}\sum_{l=0}^{N-1}\frac{\varphi_a^{(M)}(z(t_l))z'(t_l)\Delta t}{z(t_l)-\omega}.$$

Введем обозначение

$$G_{C,M}(\omega)=\frac{1}{2\pi j}\sum_{l=0}^{N-1}\frac{\varphi_a^{(M)}(z(t_l))z'(t_l)\Delta t}{z(t_l)-\omega}.$$

Если число N и сетка $t_1,...,t_N$ фиксированы, то погрешность приближения функции $\varphi_a(\omega)$ дробью $G_{C,M}(\omega)$

$$\varepsilon(C,M)=\max_{\omega\in(-\infty,\infty)}\left|\varphi_a(\omega)-G_{C,M}(\omega)\right| \quad (6)$$

зависит от выбора уравнения контура $z=z(t)$ и числа M слагаемых частичной суммы (4).

Рассмотрим однопараметрическое семейство контуров, состоящее из эллипсов C_b, проходящих через точки $z=\pm 1$ и $z=\pm jb$, $b>0$,

$$C_b=\{(x,y):x=\cos t, y=b\sin t\}.$$

Можно показать, что в этом случае при $N=2n-1$ и $t_l=\frac{\pi}{2n}+l\frac{\pi}{n}$, $l=\overline{0,2n-1}$, дробь $G_{C,M}(\omega)$ является действительной, причем ее числитель и знаменатель содержат лишь четные степени переменной ω.

Рассмотрим функционал

$$\Phi(C,M)=\max_{\omega\in(-\infty,\infty)}\left|\varphi_a(\omega)-G_{C,M}(\omega)\right|^2.$$

Поставим задачу минимизации $\Phi(C,M)$ по выбранному семейству контуров и конечному набору чисел $M=1,...,M_1<\infty$

$$\Phi(C_{b_0},M_0)=\min_{b,M}\Phi(C_b,M). \quad (7)$$

Ее решением будем искомая рациональная дробь, аппроксимирующая

$$\mathrm{h}_a^2\left(\frac{\omega}{a-1}\right).$$

Задача (7) может быть решена, в частности, методом градиентного спуска и перебором по конечному набору чисел M.

Графики полученных численно решений (7) для $n=15,20,25,30$ при $a=3$ представлены на рис. 1.

Погрешность приближения (6) для данных рациональных дробей приводится в табл. 1.

Таблица 1. Оптимальные параметры b_0 и M_0, полученные в результате численного решения задачи (7), и погрешность приближения (6) функции $\varphi_3(\omega)$ рациональными дробями $G_{C_{b_0},M_0}(\omega)$

n	10	15	20	25
$\varepsilon(C_{b_0},M_0)$	$5.72\cdot10^{-2}$	$2.09\cdot10^{-2}$	$6.12\cdot10^{-3}$	$3.11\cdot10^{-3}$
b_0	0.239	0.203	0.183	0.166
M_0	4	8	9	12

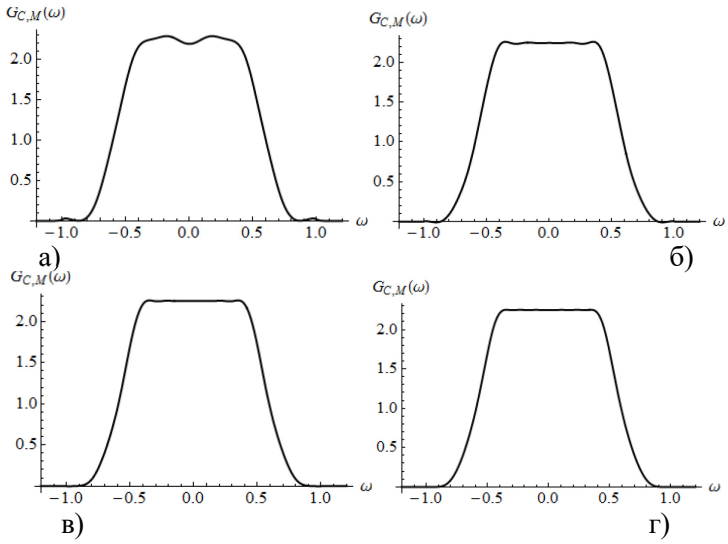


Рис. 1. *Графики рациональных дробей, аппроксимирующих функцию* $\varphi_3(\omega)$ *при а)* $n=10$, *б)* $n=15$, *в)* $n=20$ *и г)* $n=25$.

Выводы

В работе представлен метод дробно-рациональной аппроксимации квадратов атомарных функций $h_a(x)$. Описанные дробно-рациональные приближения позволят решить задачу синтеза фильтра низких частот с АЧХ, аппроксимирующей атомарную функцию. Метод легко распространяется на другие финитные функции и обладает несколькими достоинствами. С одной стороны, определение параметров дробно-рациональных приближений может осуществляться методом спуска, что довольно удобно по сравнению с алгоритмами построения наилучших равномерных приближений. С другой стороны, в отличие от приближений Паде, построенная дробь хорошо аппроксимирует финитную функцию на всей действительной оси.

Список литературы

1. К.А. Будунова. Аппроксимация финитных сплайнов и атомарных функций рациональными дробями. Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова, серия Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации, выпуск XII, с. 23-25, 2019.
2. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям. Монография. М.:Радиотехника, 2003.
3. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Цифровая обработка сигналов атомарными функциями и вейвлетами / Под ред. В.Ф. Кравченко. М.: Техносфера, 2018

CAUCHY'S FORMULA FOR RATIONAL FRACTIONAL APPROXIMATION OF SQUARED ATOMIC FUNCTIONS

junior researcher Budunova K.A.

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS
1917schw@mail.ru

The method of rational fractional approximation of squared atomic functions constructed first in current year is discussed. Analog and digital IIR filters design requires such approximation. Method is based on representation of partial Fourier sums of squared atomic functions by Cauchy's integral formula. Then integral is approximated by Riemann sums. Approximation error depending on contour parameters and number of terms in Fourier sum can be minimized.

Keywords: atomic functions, rational fractional approximation, low pass filters

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

профессор, д.т.н., профессор Львович И.Я.[1], профессор, д.т.н., профессор Преображенский А.П.[1], профессор, д.т.н., профессор Чопоров О.Н.[2], студент Милякова Е.С. [1], студент Фирсов А.В. [1]

[1]Воронежский институт высоких технологий
[2]Воронежский государственный технический университет
komkovvivt@yandex.ru

В работе рассмотрены особенности передачи информации в беспроводном канале связи при некотором отношении сигнал/шум. Показано, каким образом формируются кадры в беспроводных системах связи. Проведена аппроксимация зависимости числа кадров от среднего размера кадра.

Ключевые слова: беспроводная связь, эффективность, покрытие

Введение

При проектировании беспроводных сетей необходимо обращать внимание на использование временного ресурса. Это связано с тем, что лишь одно устройство принимает участие в процессе передачи данных. С точки зрения практических приложений число символов, которые будут передаваться в единицу времени можно рассматривать в виде меры скорости передачи. При этом, когда происходит передача всего одного символа, то соответствующий этому временной интервал будет однозначным образом фиксированной величиной.

В работе мы будем рассматривать такую характеристику: бит требуемой для передачи информации, отнесенный к одному символу. Обозначим данную характеристику N_{itos}.

Существуют справочные данные, показывающие какие будет указанная величина принимать значения по разным схемам кодирования и модуляции.

1. Исследование влияния шумов на зависимость количества бит от символа

Отношение сигнал/шум может рассматриваться как ключевая характеристика канала связи. Существует связь так называемого индекса MCS с указанной характеристикой. Значения его могут принимать 32 дискретных величины, соответствующих разным вариантам надежности/скорости передачи данных в беспроводном канале.

В литературе можно найти зависимость N_{itos} от значений сигнал/шум:

$$N_{itos.} = \{N_{itos,i}, STNMIN_i < STN_i < STNMAX_i, \quad (1)$$

здесь i – показывает номер индекса MCS, а значения $STNMIN_i$ и $STNMAX_i$ – при выбранном индексе i демонстрируют значения минимума и максимума уровня отношения сигнал/шум. При построении графической зависимости функции (1) можно убедиться, что она имеет ступенчатый вид.

2. Проведение аппроксимации функциональной зависимости

Предположим, что есть исходные данные, на основе которых мы построим функцию (1). Проведем процедуру аппроксимации на базе того, что применяется непрерывная, монотонная, неразрывная, а также всюду дифференцируемая (гладкая) функция. Анализ показывает, что при решении указанной задачи удобно остановить свой выбор на S-образной функции. Отмеченные выше требования по функции будут выполняться.

S-образные функции бывают разных типов. Например, исследователи применяют сигмоиду, гауссоиду, квадратичные сплайны. Исходя из анализа литературных источников нами была выбрана гауссоида, поскольку она показывает весьма хорошие результаты при аппроксимации:

$$N_{itos}(STN) = \begin{cases} N_{itos.-MAX}\left(1 - \overset{0}{\exp}\left(-\dfrac{STN^2}{2a^2}\right)\right) & STN < 2 \\ & STN \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

При помощи гауссоиды (2) осуществлен процесс апроксимации ступенчатой функции (1).

Исследования показывают, что максимальным будет значение N_{itos} в битах, которое будет равно 312. При этом: $N_{itos.MAX} = 312$, максимально возможное значение $N_{DBPS.}$ бит.

Для того, чтобы проводить процессы оптимизации в функционировании моделей канала можно применять полученную аппроксимацию. Она позволяет описывать зависимость количество бит данных, относящихся к одному символу, если будут задаваться некоторые из начальных условий.

3. Проблемы формирования кадров в беспроводных системах связи

Представляет интерес исследование параметров трафика в беспроводных системах связи с точки зрения их зависимости от того, какая будет длина кадра[1]. В ходе моделирования необходимо опираться на

результаты статистического анализа данных. Они получаются при процедурах мониторинга беспроводных сетевых структур. При этом период наблюдения является достаточно продолжительным. Рассматриваются две беспроводных сетевых структуры. Формирование их осуществляется на основе решений Cisco Systems. Статистические данных собираются по ним при помощи программного комплекса Cisco Prime Infrastructure, версия 3.1. В табл. 1 дана иллюстрация характеристики сетей, а также ключевых параметров, связанных с мониторингом.

Последняя из версий по стандартам 802.11a/b/g/n/ac поддерживается в обоих беспроводных структурах. Первая сетевая структура наблюдалась в течение января 2020 года в Воронежском институте высоких технологий. По ней были объединена совокупность статистических данных, связанных с пользовательскими соединениями. Вторая сетевая структура была на базе одной из компаний-разработчиков программного и сетевого обеспечения г.Воронежа. Наблюдения и сбор статистики проходили в течение февраля 2020 г. Исследования проводились исходя из того, что по обоим сетевым структурам осуществляется поддержка высокого уровня доступности. Следует отметить, что наличие, беспроводного доступа можно считать критичной характеристикой с точки зрения того, как решаются бизнес-задачи по обоим организациям. Исходя из анализа перезагрузок и сбоев в питании, которые были запланированы заранее по каждой из точек суммарное время, связанное с простоями по мониторингу, было менее чем 5 минут. Осуществлялся анализ характеристик радиопокрытия по обоим сетевым структурам.

Типовой сценарий функционирования пользователей был различным. Нагрузка в отмеченных сетевых структурах отличалась от эксперимента к эксперименту. Сами сети характеризовались различным назначением, а также нагрузками [2].

Объем тех данных, которые передавались в течение сессии, если его отнести к числу кадров определит размер кадра.

Проводился анализ таких сессий, которые характеризовались количеством переданных кадров не равных нулю. Осуществлялись процессы суммирования по восходящим и нисходящим потокам данных. На рис. 2 и 3 можно увидеть иллюстрацию для первой из беспроводных сетей, когда анализируется средний размер по кадру, значений гистограмм и функции плотности вероятности. Нет возможностей для того, как показывает анализ, чтобы применить какую-либо унимодальную модель для описания эмпирического распределения. Есть возможности для того, чтобы использовать соответствующие функции распределения, связанные с двумя статистически различными потоками кадров, которые позволяют определить формирование общего кадра.

Таблица 1. Иллюстрация параметров по сбору данных

Название параметра	**Измеряется в**	**Беспроводная структура**	
		первая	**Вторая**
Количество точек доступа по беспроводной структуре	шт.	127	132
Общее время, в течение которого велся мониторинг	Час	62	57
Значение площади покрытия беспроводной сетевой структуры	кв.м	390	510
Среднее значение площади покрытия	кв.м	310	470
Количество пользователей, которые были зарегистрированы	шт.	210	110
Число сессий, которые были зарегистрированы	шт.	429	235

Относительно функции распределения следует указать требования по ее дискретности и финитности. Хотя для упрощения рассмотрения на практике функции распределения можно прибегать к применению бесконечной непрерывной модели.

Аппроксимация зависимости задается следующими функциями:

$$f(x)=\eta_1 f_1(x)+\eta_2 f_2(x),\ \ f_{1,2}(x)=\begin{cases}\dfrac{a^k}{\Gamma(k)}x^{k-1}e^{-ax}, & x\geq 0,\\ 0 & ,\ x<0.\end{cases} \tag{4}$$

Первое выражение рассматривается в виде комбинации двух Гамма-распределений. Для них параметры даны в табл. 2.

Таблица 2 Иллюстрация значений по параметрам распределений

Беспроводная сеть		Параметры распределения							
		α_1	k_1	η_1	М, байт	α_2	k_2	η_2	М, байт
Значение размера кадра	Первая	105,3	2,35	0,77	245	29,8	27,2	0,25	781
	Вторая	103,7	1,04	0,35	107	16,6	30,4	0,67	498

Рис. 2. *Иллюстрация распределения среднего размера кадра по первой беспроводной сети.*

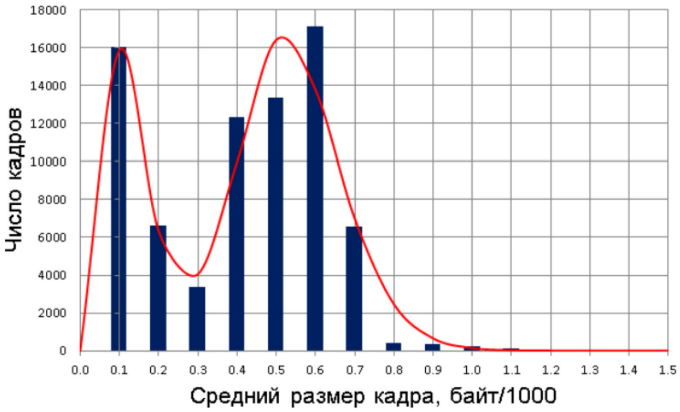


Рис. 3. *Иллюстрация распределения среднего размера кадра по второй беспроводной сети.*

Те результаты, которые были получены, позволяют утверждать, что в беспроводном канале происходит распространение кадров, связанных с разными источниками.

Выводы

В работе проведены исследования характеристик беспроводных сетей при возможном воздействии помех. Проведена аппроксимация количества кадров в беспроводном канале.

Список литературы

1. Мишин Я.А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 153-156.
2. Казаков Е.Н. Разработка и программная реализации алгоритма оценки уровня сигнала в сети wi-fi // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1 (12). С. 13.

ABOUT RESEARCHING THE EFFICIENCY OF WIRELESS NETWORKS

professor, doct.tech.sci., professor Lvovich I.Ya.[1], professor, doct.tech.sci., professor Preobrazhenskiy A.P.[1], professor, doct.tech.sci., professor Choporov O.N. [2], student Milyakova E.S. [1], student Firsov A.V. [1]

[1]Voronezh institute of high technologies
[2]Voronezh state technical university
komkovvivt@yandex.ru

The paper considers the features of information transmission in a wireless communication channel at a certain signal-to-noise ratio. Shows how frames are formed in wireless communication systems. The approximation of the dependence of the number of frames on the average frame size is carried out.

Keywords: wireless communication, efficiency, coverage

ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА СПУТНИКОВОЙ СВЧ-РАДИОМЕТРИИ

к.ф.-м.н., с.н.с. Данилычев М.В.[1], к.ф.-м.н., в.н.с. Аквилонова А.Б.[2], д.ф.-м.н., профессор, г.н.с. Кутуза Б.Г.[1], к.ф.-м.н., в.н.с. Смирнов М.Т.[2]

[1]Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, [2]Фрязинское отделение Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Фрязино
dan496@yandex.ru, anna@ire.rssi.ru, kutuza@cplire.ru, smirnov@sunclass.ire.rssi.ru

В докладе делается обзор нынешнего состояния российской орбитальной группировки спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с точки зрения возможностей СВЧ- радиометрической составляющей полезной нагрузки. Рассматриваются наиболее интересные из существующих и перспективных систем спутниковой микроволновой радиометрии (РМС). На основе анализа существующего мирового опыта предлагается оптимальная, с точки зрения авторов, последовательность действий по развертыванию на орбите эффективно работающего комплекса средств спутниковой СВЧ-радиометрии.

Ключевые слова: спутник, дистанционное зондирование, СВЧ-радиометрия

Введение

Спутниковые СВЧ- радиометры предназначены для приема, обработки и представления в надлежащем виде информации о микроволновом излучении, восходящем из исследуемой дистанционными методами системы “атмосфера – подстилающая поверхность”. Стандартной формой представления информации для конечного пользователя данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является одномерное, двухмерное или трехмерное распределение ряда геофизических параметров в глобальной системе “атмосфера – подстилающая поверхность” или в некоторой ее локальной области [1,2]. Исторически первым [1-3] и самым простым схемотехническим решением стали т.н. трассовые радиометры, антенны которых обеспечивают прием сигнала через единственный главный лепесток диаграммы направленности антенны (ДНА), положение которого в пространстве фиксировано по отношению к осям ориентации космического аппарата (КА). При этом используются в основном апертурные антенны типа рупор, линза, зеркало и их различные комбинации. В зависимости от требований задачи и имеющихся ограничений ширина ДНА по уровню половинной мощности (3dB) выбирается обычно в пределах от 1 до 15º. При надлежащем выборе постоянной интегрирования/частоты опроса такая схема обеспечивает наилучшее из возможных значений радиометрического разрешения в линейном элементе – “пятне” главного лепестка ДНА, которое движется вдоль снимаемой “одномерной полосы”, но не позволяет получить какое-либо разрешение по азимуту. В настоящее время для целей дистанционного зондирования Земли из космоса в качестве самостоятельных и самодостаточных систем радиометры данного типа почти не используются. Теперь их основное предназначение – обеспечение калибровок и коррекции потока данных базовой обзорной радиометрической системы (РМС) или метеокоррекции данных активных датчиков типа скатерометров или альтиметров, а также - в качестве датчиков контроля уровня подсвета от внеатмосферных источников. В 1968-ом году в СССР был запущен ИСЗ “Космос-243” с первым в мире многочастотным радиометром, предназначенным для радиометрического зондирования планеты Земля, [1-3]. В состав бортового радиоспектрометра ИСЗ “Космос-243” входили направленные в надир каналы с длинами волн 0.8, 1.35, 3.4 и 8.5 см. Ширина ДНА по уровню половинной мощности и постоянная времени интегрирования составляли 4° и 3с для канала 0.8см, 3.6° и 2.2с для канала 1.35см, 4° и 1.3с для 3.4см, 8.6° и 2.2с для 8.5см. При таких значениях ширины ДНА и постоянной времени флуктуационная (приборная) чувствительность каналов (1.9, 1.3, 0.6 и 0.7 К соответственно) позволяла получить температурную чувствительность в элементе пространственного разрешения порядка ~0.5К для поверхностных (3.4 и 8.5 см) и ~1.0К для атмосферных (0.8 и 1.35 см) каналов, [3]. Работа трассового надирного многочастотного радиометра на борту ИСЗ “Космос-243” впервые продемонстрировала реальные возможности спутниковой радиометрии по дистанционному зондированию системы “атмосфера – подстилающая поверхность” путем измерений и последующего анализа собственного микроволнового излучения Земли [1-3]. Проведенные эксперименты показали преимущества и эффективность радиофизических методов исследования природной среды и, более чем на четыре года, опередили аналогичные исследования, выполненные на американском спутнике “Nimbus-5” (Staelin et al., 1973), [2]. До начала 90-х годов 20-ого века развитие спутниковых РМС происходило в контексте общего научно-технического соперничества СССР и США. В настоящее время в разработке и запуске на орбиту средств спутниковой микроволновой радиометрии принимают активное участие уже более 30 стран. Лидирующие позиции и наиболее интересные научно-технические решения на современном этапе развития спутниковых РМС принадлежат разработчикам США, объединенной Европы и Японии. Значительный задел и одна из самых больших космических группировок спутников ДЗ имеется также у КНР. События конца 20-ого – начала 21-ого века, к сожалению, нанесли существенный вред российской космической программе и ее сегменту дистанционного зондирования. В настоящее время

предпринимаются усилия по восстановлению российской группировки спутников ДЗЗ. Существует концепция развития средств видимого и инфракрасного диапазонов, которая довольно успешно реализуется на практике – аппаратура этих диапазонов функционирует на КА серий “Ресурс-П”, “Канопус-В”, “Электро-Л”. Однако РМС микроволнового диапазона присутствует только на одном российском КА – гидрометеорологическом спутнике “Метеор-М” №2-2 [10]. Представляется необходимым проанализировать научно-технологические достижения мирового научного сообщества и выбрать наиболее оптимальные пути развития национальной программы по восстановлению орбитальной группировки средств спутниковой СВЧ- радиометрии.

За прошедшие с момента запуска ИСЗ “Космос-243” более чем полвека бортовые радиометры эволюционировали в сложные высокоинформативные радиотехнические комплексы, работающие по существенно более сложным алгоритмам сбора и обработки радиометрических данных [1,2]. Были разработаны и успешно испытаны в ходе работ на орбите следующие варианты технологических схем: 1) однолучевые радиометрические системы (РМС) с пространственным сканированием главного лепестка ДНА; 2) многолучевые РМС апертурного синтеза (системы с нелинейной обработкой сигнала), и 3) многолучевые РМС панорамного типа.

1. Однолучевые РМС с пространственным сканированием луча.

РМС данного типа делятся по принципу сканирования луча на системы с механическим и электрическим способом сканирования. При выполнении пространственного сканирования, довольно узкий, как правило, от 0.5º до 5º по уровню половинной мощности (3dB), луч главного лепестка ДНА описывает заданную траекторию обзора системы "поверхность- атмосфера" в полосе обзора примыкающей к проекции орбиты (следу) спутника. Получение радиометрической информации о сканируемом пространстве осуществляется методом последовательного опроса строк, возникающих при поступательном движении спутника в сочетании с периодическим движением луча относительно самого спутника. К числу режимов сканирования, реализуемых на практике, относятся режим "качания" луча в плоскости, поперечной вектору скорости спутника, называемый режимом "поперечного" или иногда "линейного сканирования", и, режим "конического вращения" луча с постоянным углом наклона к надирной оси аппарата (см.ниже рис.1).

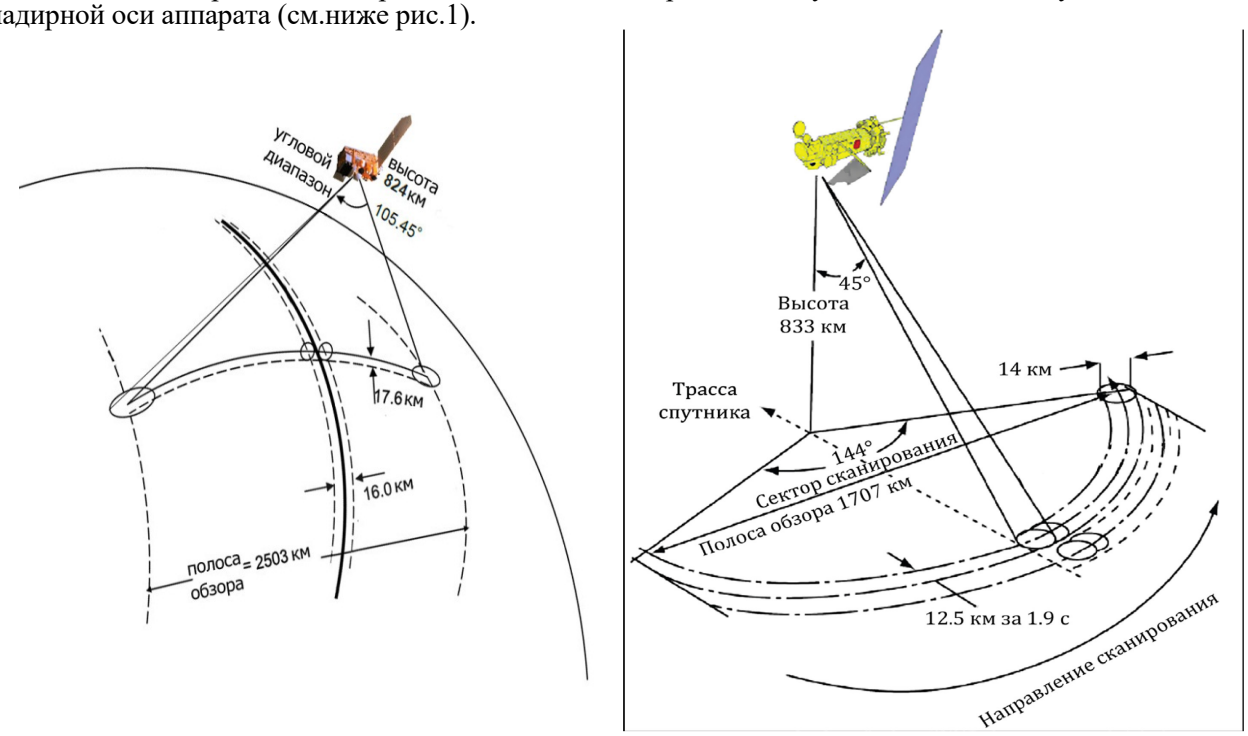


Рис. 1. *1) Геометрия "поперечного" сканирования для комплекса ATMS, [4-6].*
2) Режим "конического" сканирования на примере работы РМС SSMIS (поколение Block 5D-3 программы DMSP), [2,7,9].

Первый вариант мало пригоден для исследования протяженных поверхностных источников с ярко выраженной угловой зависимостью интенсивности и поляризационных свойств, например, поверхности океана, и, кроме этого, требует дополнительной геометрической коррекции зависимости формы и площади элемента разрешения от угла наблюдения. Поэтому, в настоящее время его в основном задействуют в конструкции радиометров, предназначенных для атмосферного зондирования вблизи линий поглощения, в частности, для восстановления атмосферных профилей температуры и влажности [1,4-6]. Подобная схема отличается малыми показателями по массе, габаритам и энергопотреблению, а также исключительно высокой надежностью при относительно невысокой стоимости и большой полосе обзора (до 2600 км при высоте полета ~ 830 км). СВЧ радиометры данного типа нередко работают в паре с аналогично устроенными радиометрами-спектрометрами ИК-диапазона и обеспечивают

восстановление параметров атмосферы с достаточно высоким качеством. Ярким примером является семейство многоканальных микроволновых атмосферных зондировщиков: MSU (Microwave Sounding Unit) - AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) - ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder), см. рис.2, [4-6]. Начиная с 1978 года, и по сей день, различные представители этой технологической линии работают на борту целого ряда американских, европейских и японских метеорологических спутников [4-6]. В базовой конструкции наиболее современного поколения аппаратуры (AMTS) для восстановления атмосферных профилей температуры и влажности, а также параметров облачности и осадков, используются измерения в 22-х рабочих диапазонах с разнесенными частотами и полосами пропускания в интервале от 23 до 184 ГГц, [5]. Период равномерного кругового вращения двухзеркальной системы (вокруг оси параллельной продольной оси спутника) составляет 8/3 с, угловой диапазон съемки ±52.73° от надира, число позиций при съемке - 96, угловое расстояние между соседними позициями – 1.11°. Угловая ширина ДНА меняется в пределах от 5.2° (по уровню 3dB) для низкочастотных и до 1.1° для высокочастотных каналов. При этом размеры прибора не превышают 70см x 60см x 40см.

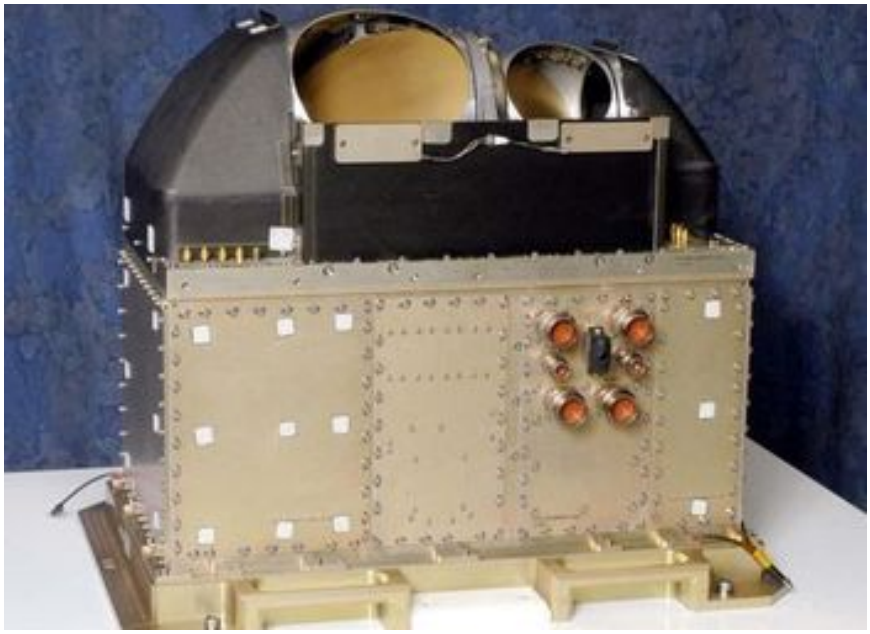


Рис. 2. *Внешний вид многоканального радиометрического комплекса ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) - атмосферного зондировщика-профилографа, [5].*

В большинстве современных РМС СВЧ- диапазона, предназначенных для одновременного зондирования как атмосферы, так и поверхности, принято использовать режим "конического вращения" луча ДНА. Этот способ пространственного обзора позволяет получать гораздо более качественный и единообразный конечный продукт, удобный для интерпретации и использования широким кругом научных и практических пользователей. При такой схеме работы можно предусмотреть режимы сбора радиометрической информации в переднем азимутальном секторе (по отношению к направлению полета), заднем или в обоих одновременно, что позволяет минимизировать вклад от радиоизлучения Солнца, рассеянного на водной поверхности и получать информацию об объектах с разных ракурсов съемки. Пример реализации “утреннего” режима (“полет навстречу Солнцу со съемкой в задней полусфере”) показан выше на рис.1 для комплекса SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder), установленного на борту спутников поколения Block 5D-3 по программе DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), [7,9]. Основная на сегодняшний день схема построения многоканального поляризационного радиометра космического базирования предполагает использование целого набора (от 4-ех до 50-и) выделенных рабочих каналов с различными частотами (от 5 до 300 ГГц), поляризациями, шириной полосы пропускания, временем интегрирования и т.д.. Для формирования прецизионного АФУ с малым уровнем потерь чаще всего используется зеркало с набором интегрированных, т.е.общих для нескольких каналов, облучателей, см., например, американскую РМС SSMIS [9] или российскую РМС МТВЗА-ГЯ (см.рис.3), [10]. Расхождение антенных лучей, которое обусловлено применением такого группового облучателя, стараются минимизировать и, как правило, оно находится в пределах 0°-5°, а диаметр зеркала выбирается в пределах от 0.5 до 2.5 м. Антенная система, многочастотные облучатели и СВЧ- приемники размещаются единым блоком на прецизионной сканирующей платформе. Сочетание режима конического вращения антенных лучей и орбитального движения спутника обеспечивает циклоидальную траекторию поверхностного сканирования с необходимым для Заказчика постоянным значением угла (-ов) встречи с поверхностью (обычно в диапазоне от 45° до 65° к местной нормали). Естественным свойством такой конструкции является большая полоса обзора - азимутальный сектор от 120° и более. Теоретически можно сконструировать РМС и платформу-носитель таким образом, что

рабочий сектор займет полный или почти полный круг (за исключением секторов калибровки). При выборе такой схемы достаточно просто реализуется возможность использования для внешней калибровки в качестве холодного эталона фонового излучения космоса (~2.73К) и одного или нескольких "горячих" эталонов на борту. Время скана (период оборота) обычно выбирается в интервале 1.5-4.0с, а первичное время интегрирования для разных каналов составляет от 3 до 30 мс. За период сканирования след спутника перемещается на определенную величину (~9÷25км), которую удобно выбрать в качестве единого пространственного элемента квантования сигнала для всех радиометрических каналов.

Рис. 3 *Внешний вид РМС МТВЗА-ГЯ [10].*

Приборная радиометрическая чувствительность современных "поверхностных" (λ≥3см) каналов оценивается величиной ~0.03-0.06К, что позволяет достигнуть чувствительности в пространственном элементе (25÷100км) порядка 0.3-0.7К. Для "атмосферных" каналов (λ≤1.6см), с учетом специфики узкополосного атмосферного профилирования, разброс увеличивается: ~0.03-0.3К для радиометрической (приборной) чувствительности и ~0.3-3.0К для чувствительности в элементе пространственного разрешения (~5-50км), см. ниже таблицу 1. Самой известной представительницей современного поколения мелкосерийной аппаратуры, предназначенной для установки и рутинного использования на серийных и экспериментальных метеорологических спутниках, является уже упомянутая американская РМС SSMIS [7,9]. Эта система, как и многие другие современные РМС, стала результатом переосмысления опыта работы и последующего развития конструкции своего знаменитого предшественника - радиометрического комплекса SSM/I (Special Sensor Microwave Imager), [6,8]. Помимо элементной базы следующего поколения, к новшествам конструкции SSMIS следует отнести тот факт, что она вобрала в себя не только особенности сканера SSM/I, который работал на 7-и линейно-поляризованных каналах (H,V-поляризации на частотах 19.35, 37 и 85 ГГц, и V-поляризация на 22.235 ГГц), но и перекрыла возможности 2-х ранее сопутствующих SSM/I на борту атмосферных зондировщиков: SSM/T-1 (Special Sensor Microwave Temperature Sounder, 7 каналов в диапазоне от 50 до 60 ГГц) и SSM/T-2 (Special Sensor Microwave Water Vapor Profiler-2, 10 каналов в диапазоне от 90 до 190 ГГц) [10]. Назначение и конструкция аппаратуры SSM/T-1 и SSM/T-2B было аналогичным ранним образцам семейства MSU, [4-6]. В настоящее время бортовая РМС SSMIS является основным прибором микроволнового мониторинга для начатой в 60-х годах 20-ого века и непрерывно функционирующей по сию пору долгосрочной военной программы оперативного метеорологического мониторинга DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) [9]. В АФУ комплекса SSMIS входят зеркальная антенна диаметром 61 см и 6 интегрированных облучателей, работающих в 24-х частотных диапазонах в интервале от 19 до 184 ГГц.

Время интегрирования составляет 4.2 мс для каналов с номерами 8-11 и 17-18, 8.4 мс – в диапазонах №12-№16, 12.6 мс - в диапазонах №1-№7 и №24, и 25.2 мс - для каналов №19-№23. При установочном угле сканирования в 45º к надиру и заданной высоте полета (~833км), угол встречи с поверхностью составляет

53.1º к местному зениту для всех радиометрических каналов. Период вращения равен 1.9 с (31.6 об/мин), смещение вдоль следа ~12.5 км/период. Схема управления предусматривает режим сбора радиометрической информации в переднем азимутальном секторе (~144°, 1707 км), заднем (~144°, 1707 км), в обоих одновременно, что позволяет минимизировать вклад от радиоизлучения Солнца, рассеянного на водной поверхности. SSMIS представляет собой современную высоконадежную микроволновую РМС, которая позволяет оперативно собирать обширную информацию о параметрах подстилающей поверхности и атмосферы вплоть до высот порядка ~80 км. К определенным недостаткам данной системы, с точки зрения комплексного подхода, следует отнести отсутствие "поверхностных" каналов в диапазоне 6-11 ГГц. Минимальная рабочая частота составляет 19.3 ГГц. На практике это означает, что на основе получаемой информации можно делать достаточно достоверные прогнозы текущей погоды и ее возможных краткосрочных изменений (на срок до ~3-4 дней).

Таблица 1. Основные характеристики РМС SSMIS

№ канала	Центральная частота (ГГц)	3-db полоса (МГц)	Стабиль-ность (МГц)	Поляри-зация	Чувствительность в элементе разрешения (К)	Элемент разреше-ния (км)
1	50.3	380	10	V	0.34	37.5
2	52.8	389	10	V	0.32	37.5
3	53.596	380	10	V	0.33	37.5
4	54.4	383	10	V	0.33	37.5
5	55.5	391	10	V	0.34	37.5
6	57.29	330	10	RCP	0.41	37.5
7	59.4	239	10	RCP	0.40	37.5
8	150	1642(2)	200	H	0.89	12.5
9	183.31 ± 6.6	1526(2)	200	H	0.97	12.5
10	183.31 ± 3	1019(2)	200	H	0.67	12.5
11	183.31 ± 1	513(2)	200	H	0.81	12.5
12	19.35	355	75	H	0.33	25
13	19.35	357	75	V	0.31	25
14	22.235	401	75	V	0.43	25
15	37	1616	75	H	0.25	25
16	37	1545	75	V	0.20	25
17	91.655	1418(2)	100	V	0.33	12.5
18	91.655	1411(2)	100	H	0.32	12.5
19	63.283248 ± 0.285271	1.35(2)	0.08	RCP	2.7	75
20	60.792668 ± 0.357892	1.35(2)	0.08	RCP	2.7	75
21	60.792668 ± 0.357892 ± 0.002	1.3(4)	0.08	RCP	1.9	75
22	60.792668 ± 0.357892 ± 0.0055	2.6(4)	0.12	RCP	1.3	75
23	60.792668 ± 0.357892 ± 0.016	7.35(4)	0.34	RCP	0.8	75
24	60.792668 ± 0.357892 ± 0.050	26.5(4)	0.84	RCP	0.9	37.5

Наличие в наборе более длинноволновых каналов позволило бы поднять точность восстановления всех (а не только температуры океана!) параметров системы “атмосфера – подстилающая поверхность”, и, как следствие, создать условия для повышения достоверности уже среднесрочных прогнозов (до 7-10 суток). С этих позиций более совершенной, например, выглядит упомянутая ранее (рис.3) российская разработка – РМС МТВЗА-ГЯ [10], в состав которой входят 29 каналов в полосе частот от 10 до 184 ГГц. Вместе с тем она уступает SSMIS по ширине полосы захвата (1500км) и ряду других показателей. Состав и согласованный режим работы всей существующей группировки DMSP- спутников [2,9] обеспечивают высокую частоту радиометрической съемки заданного района планеты (не менее 2-х проходов в сутки). Точность и полнота восстановления геофизической информации повышается при этом также за счет дополнительного использования данных от иных единичных аппаратов, которые действуют в рамках различных специализированных научно-исследовательских миссий. В большинстве подобных миссий, помимо базовой микроволной РМС с коническим вращением луча, на борту присутствуют сканеры оптического и инфракрасного диапазонов, разнотипные радары миллиметрового и сантиметрового диапазонов и атмосферные зондировщики- профилографы, аналогичные семейству MSU-AMSU-ATMS. Для создания на орбите эффективно работающей российской группировки спутников ДЗЗ необходимо не только обеспечить в 2021-2023гг. запуск запланированных, в дополнение к единственному имеющемуся ”Метеор-М” №2-2, еще 2-ух спутников серии “Метеор-М” с аппаратурой МТВЗА-ГЯ, но и создать качественный российский аналог аппаратуры ATMS [5]. При всех своих недостатках РМС этого типа гораздо менее критичны к выбору места на борту КА, нежели системы с коническим вращением, к которым относится и МТВЗА-ГЯ. Они достаточно компактны, обладают сниженным энергопотреблением, и, в силу этого, могут быть легко интегрированы в состав приборного комплекса нового поколения полярно-орбитальных КА типа “Ресурс-П” и “Канопус-В”, которые составляют и, по-видимому, будут в дальнейшем составлять основу национальной группировки спутников ДЗЗ. При совместной работе с аналогично устроенными штатными радиометрами-спектрометрами видимого и ИК- диапазона такая аппаратура позволит решать значительную часть задач атмосферного зондирования. Вместе с постепенно выводимыми, в течение ближайших лет, на орбиту РМС МТВЗА-ГЯ

создаваемая группировка сможет обеспечить необходимое для текущего оперативного метеоконтроля временное разрешение в системе “атмосфера – подстилающая поверхность”.

Описанная радиометрическая технология на сегодняшний момент является наиболее проработанной, надежной и эффективной. Во всяком случае, в мм- и см- диапазонах радиоволн она позволяет вполне удовлетворительно разрешать значительное число существующих задач. Для них путем соответствующей оптимизации удается достигнуть разумного компромисса в сочетании значений пространственного и температурного разрешения и одновременно получить максимально широкую полосу обзора с хорошим временным разрешением. Однако, вскоре, по мнению авторов, перед сегментом ДЗЗ встанут новые задачи, которые потребуют существенного улучшения пространственного и/или температурного разрешения. К ним, в частности, можно отнести задачи мониторинга температурного режима водной поверхности в умеренных и полярных широтах, а также отслеживание совокупности процессов зарождения и эволюции тропических ураганов [1,11]. Помимо модернизации “классической” РМС МТВЗА-ГЯ, по мнению авторов, для решения этих задач необходимо использовать возможности многолучевых РМС панорамного типа и РМС апертурного синтеза [11,12].

2. Предложения по использованию многолучевых РМС

Расчеты, выполненные в работе [11], показывают, что, в отличие от тропических и субтропических вод, при работе в умеренных и полярных широтах, наличие в составе универсальной бортовой РМС, в частности, модернизированной МТВЗА-ГЯ, h- и v- каналов диапазона 6-7 ГГц является насущной необходимостью. Использование каналов в этом диапазоне обеспечивает сохранение достаточной точности восстановления температуры поверхности океана при работе в умеренных и полярных широтах, поскольку эти каналы теряют в величине температурной чувствительности в гораздо меньшей степени, чем каналы на 10.7ГГц при температуре воды менее ≈+15°С. Сделанный вывод не подразумевает требования обязательного "встраивания" каналов 6.8h и 6.8v непосредственно в конструкцию РМС МТВЗА-ГЯ [10,11]. Более рациональным представляется введение этих каналов в состав комплексной бортовой РМС в виде одной или нескольких независимых от МТВЗА-ГЯ секций многолучевого панорамного радиометра апертурного типа с диаметром зеркала в ~1.5 раза (~1.0м) больше чем у общего для всех своих каналов зеркала МТВЗА-ГЯ (~0.65м). Такой подход способствовал бы дополнительному повышению радиометрической чувствительности этих каналов в элементе пространственного разрешения (не хуже 0.1К!) при параметрах пространственного разрешения не уступающих показателям каналов МТВЗА-ГЯ на частоте 10.7ГГц, а также повысил бы общую надежность бортового радиометрического комплекса. Повышение точности восстановления температуры поверхности закономерно способствовало бы улучшению качества восстановления всех остальных параметров системы “океан-атмосфера”.

Для мониторинга возникновения и эволюции тропических ураганов авторы предлагают ввести в состав бортового радиометрического комплекса на основе доработанного варианта РМС МТВЗА-ГЯ отдельную РМС работающую по технологии апертурного синтеза [11,12]. Эффективное применение таких РМС на практике возможно, если решаемая задача характеризуется требованием высокого пространственного разрешения и наличием достаточно больших радиояркостных контрастов [1,11]. Что и проявляется весьма отчетливо в рассматриваемой задаче, где перепады яркостной температуры доходят до 70-100 К [11]. Выполненные в работе [12] оценки позволяют надеяться на то, что в диапазоне длин волн 0.3-2.25 см можно построить РМС апертурного синтеза с полосой частот ~100МГц, необходимым (единицы километров) пространственным разрешением и чувствительностью в элементе разрешения не хуже 1-1.5 К.

Заключение

В настоящем докладе изложена оптимальная, с точки зрения авторов, стратегия развития отечественного сегмента спутниковый СВЧ-радиометрии. Анализ выполнен с учетом имеющихся наработок, с упором на эффективность предлагаемых технических решений и минимизацию временного и финансового факторов.

Работа выполнена в рамках Госзадания по теме 0030-2019-0008 “Космос”.

Список литературы

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности //М.: Ленанд, 2016г., 338с.
2. Данилычев М.В., Кравченко В.Ф., Кутуза Б.Г., Чуриков Д.В. Спутниковые СВЧ радиометрические комплексы дистанционного зондирования Земли. Современное состояние и тенденции развития //Физические основы приборостроения, 2014, т.3, №1, с.3.
3. Гурвич А.С., Кутуза Б.Г. “Космос-243” – первый в мире эксперимент по исследованию Земли из космоса радиофизическими методами //Исслед. Земли из космоса, Март-Апрель 2010, № 2, с.14.
4. http://microwavescience.jpl.nasa.gov/instruments/amsu/overview/
5. http://npp.gsfc.nasa.gov/atms.html
6. John J. Qu, Wei Gao, Menas Kafatos, Robert E. Murphy, Vincent V. Salomonson Earth Science Satellite Remote Sensing Vol. 1: Science and Instruments // Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg New York, 2006, 418p.
7. http://nsidc.org/data/docs/daac/ssmis_instrument/index.html
8. http://www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/ssmi/swath/fnoc-ssmi-manual.pdf

9. https://www.aerospace.org/2013/12/30/dmsp-instruments-a-50-year-legacy/
10. Болдырев В.В и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ, в книге: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей, ИКИ РАН, 2008, вып.5, т.1, с.243.
11. Данилычев М.В., Ермаков Д.М., Кутуза Б.Г., Саворский В.П. Многолучевые системы в составе бортового СВЧ-радиометрического комплекса //Физические основы приборостроения. 2018. т.7. № 1(27). с.37-45.
12. B.G.Kutuza, and G.K.Zagorin Two-dimensional synthetic aperture millimeter-wave radiometric interferometer for measuring full-component Stokes vector of emission from hydrometeors //Radio Science, vol. 38, № 5, pp. 11-1 – 11-7, 2003.

OPTIMAL DEVELOPMENT STRATEGY FOR THE RUSSIAN SEGMENT OF SATELLITE MICROWAVE RADIOMETRY

Danilychev M.V., Akvilonova A.B., Kutuza B.G., Smirnov M.N.

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS
dan496@yandex.ru
anna@ire.rssi.ru
kutuza@cplire.ru
smirnov@sunclass.ire.rssi.ru

The report provides an overview of the current state of the Russian orbital Constellation of earth remote sensing (ERS) satellites in terms of the capabilities of the microwave radiometric component of the payload. The most interesting existing and promising satellite microwave radiometry (RMS) systems are considered. Based on the analysis of existing world experience, the authors suggest the optimal sequence of actions for deploying an effective national complex of satellite microwave radiometry facilities in orbit.

Keywords: satellite, remote sensing, microwave radiometry

СЕКЦИЯ 3: **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Руководители: д.ф.-м.н. **В.Э. Пожар**

д.т.н. **А.С. Мачихин**

ИНТЕРФЕРОМЕТР МАЙКЕЛЬСОНА С РЕЗОНАТОРАМИ ФАБРИ-ПЕРО ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

г.н.с., д.ф.м.н., Петров Н.И., д.ф.м.н., Пустовойт В.И.

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
petrovni@mail.ru

Предложен компактный лазерный интерферометр с резонаторами Фабри-Перо, состоящий из двух пространственно-распределенных "зеркал" для регистрации гравитационных волн. Чувствительность такого интерферометра при малых перемещениях зеркал относительно друг друга превышает чувствительность системы LIGO. Предложен метод обнаружения гравитационных волн, основанный на регистрации корреляционной функции для интенсивностей излучения резонансных мод ненулевого порядка от двух плеч интерферометра Майкельсона.

Ключевые слова: интерферометр Майкельсона, резонатор Фабри-Перо, разрешение фильтра, чувствительность интерферометра

Введение

Идея использования лазерных интерферометров для регистрации гравитационных волн впервые была высказана в 1962 году в работе [1], где был предложен новый метод регистрации гравитационных волн, основанный на использовании лазерного интерферометра. В 2015 году эти волны были экспериментально обнаружены двумя детекторами лазерной интерференционной гравитационно-волновой обсерватории (LIGO) в Хэнфорде и Ливингстоне (США) [2, 3]. Подробный анализ современного состояния проблемы приведен в обзоре [4].

Известно, что чувствительность детекторов для обнаружения гравитационных волн определяется отражательной способностью зеркал. Минимальное смещение тела, которое может быть зарегистрировано, пропорционально отражательной способности зеркал в детекторе гравитационных волн ($x_{\min} \sim (1\text{-}R)$) [5]. Новые возможности появляются при использовании распределенных резонаторных зеркал, представляющих собой трехмерные дифракционные решетки, создаваемые в объеме кристалла. Как было показано в работе [6], вблизи брэгговской частоты такого резонатора появляются сверхузкие линии прозрачности. В [7, 8] было рассмотрено влияние поглощения света и внедренных диэлектрических наночастиц на разрешение таких фильтров. Использование резонаторов Фабри-Перо с периодическими структурами в качестве отражающих зеркал для регистрации гравитационных волн рассматривалось в работе [9]. Показано, что при использовании таких резонаторов чувствительность лазерной гравитационной антенны может быть значительно повышена по сравнению с обычными интерферометрами Фабри-Перо. Расстояние между периодическими структурами было принято равным 628 м, что значительно меньше расстояния между зеркалами в установке LIGO. Отметим, что оценки чувствительности предложенного метода измерения к изменениям интерференционной картины были сделаны для максимума нулевого порядка. Представляет интерес оценка чувствительности метода измерения к смещению максимумов резонансных мод ненулевого порядка.

В работе показана возможность создания лазерного интерферометра с распределенными зеркалами для регистрации гравитационных волн в лабораторных условиях. В качестве отражающих зеркал, образующих оптический интерферометр Фабри-Перо, предлагается использовать отражающие периодические структуры, имеющие экспоненциально узкую полосу пропускания лазерного излучения. Показано, что спектральное разрешение 10^{-23} см$^{-1}$ может быть достигнуто при расстоянии между зеркалами всего 1-3 м. Исследовано также влияние поглощения света в кристаллах на предельное разрешение таких резонаторов. Предложен метод, основанный на измерении корреляционной функции интенсивности резонансных мод ненулевого порядка от двух плеч интерферометра Майкельсона, чувствительность которого превышает чувствительность системы LIGO.

1. Резонатор Фабри-Перо с периодическими структурами в качестве отражающих зеркал

Рассмотрим резонатор Фабри-Перо, образованный двумя периодическими структурами, расположенными на расстоянии d друг от друга (рис. 1). Излучение распространяется слева направо. Наша цель - найти интенсивность излучения, которое вышло из резонатора (или аппаратную функцию резонатора).

Общая форма передаточной функции показана на рис. 2. Видно, что спектр пропускания состоит из множества максимумов (рис. 2).

Как видно из рис. 2, изменение расстояния между зеркалами влечет за собой изменение спектра пропускания интерферометра: расстояние между максимумами изменяется вследствие сдвига частоты резонансных мод ненулевого порядка $m \neq 0$. Отметим, что сдвиг пиков увеличивается с порядком моды.

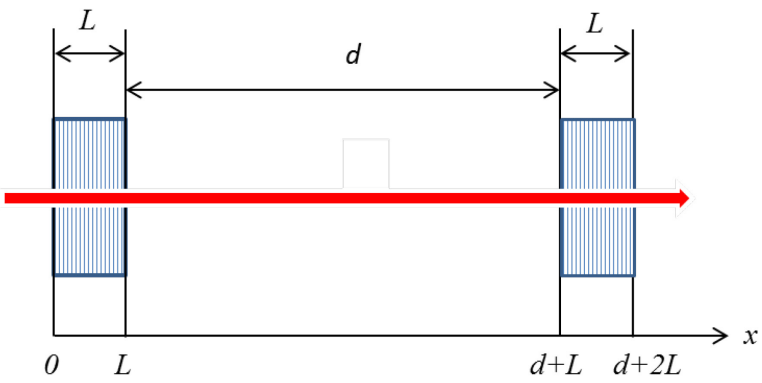


Рис. 1. *Резонатор Фабри-Перо с периодическими структурами в качестве отражающих зеркал.*

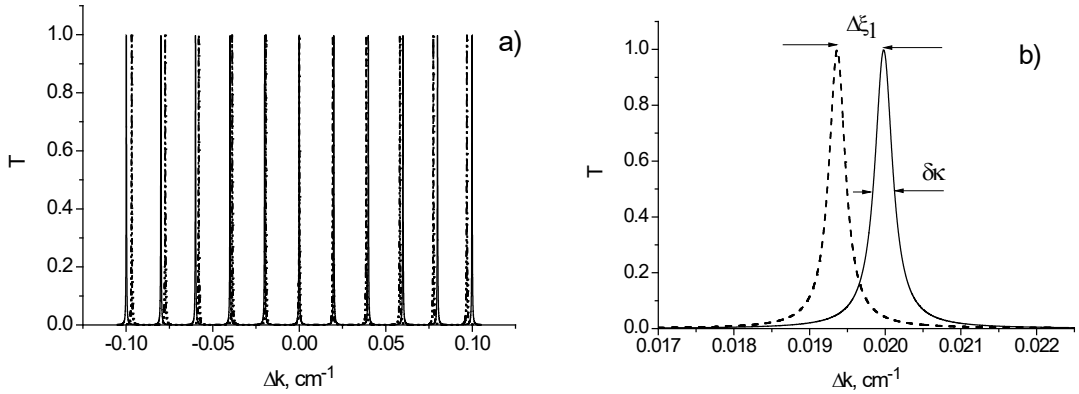


Рис. 2. *Кривые пропускания в зависимости от расстройки* Δk *. (а) набор пиков от двух плеч интерферометра Майкельсона с различными расстояниями между зеркалами; (б) пики, соответствующие моде 1-го порядка для расстояний d and d + Dd.* $\varphi = \pi$ *. d = 100p см, L = 0.75 см, l = 0.63 mm.*

Из вычислений следует, что ширина линии пропускания резко уменьшается с увеличением амплитуды модуляции показателя преломления. Ширина линии пропускания может достигать значений $\delta k \simeq 10^{-23}$ см$^{-1}$ при $\Delta\varepsilon = 3.3 \cdot 10^{-4}$ и $d = 1$ м. Это означает, что спектральное разрешение фильтра равно

$$\delta\lambda/\lambda_0 = \delta k/k_0 = \frac{\lambda_0}{2\pi} \cdot 10^{-23} cm^{-1} \simeq 10^{-24} \quad . \tag{1}$$

2. Метод регистрации гравитационных волн

Экспериментальные установки для регистрации гравитационных волн основаны на идее интерферометра Майкельсона с резонаторами Фабри-Перо в каждом из его плеч. Зеркала, образующие резонатор Фабри-Перо, используются в качестве свободно подвешенных тестовых масс, расстояние между которыми изменяется под действием гравитационной волны. Идея такого лазерного интерферометра как метода регистрации гравитационных волн впервые была предложена в работе [1].

Под действием гравитационной волны расстояние между двумя свободными телами изменяется [5]:

$$d \to d_0 + \Delta d = d_0 (1 + h), \tag{2}$$

где Δd - малое смещение зеркал, h - амплитуда гравитационной волны.

В настоящее время антенны LIGO достигли чувствительности $h \simeq 10^{-21}$, достаточной для обнаружения гравитационного излучения от слияния двух черных дыр [2]. При смещении зеркал в спектре пропускания смещаются линии, соответствующие модам ненулевого порядка. Смещение резонансных линий пропускания и изменение расстояния между пиками приводит к изменению корреляционной функции, измеренной в эксперименте.

Чувствительность предложенного метода можно оценить по сдвигу линий в спектре пропускания, обусловленному изменением расстояния между зеркалами в одном из плеч интерферометра Майкельсона с резонаторами Фабри-Перо под действием гравитационной волны.

Изменение расстояния Δd связано с частотным сдвигом $\Delta\xi_m$ соотношением

$$\frac{\Delta\xi_m}{\xi_m} = -\frac{\Delta d}{d} = h \simeq 10^{-21}. \tag{3}$$

Разрешающая способность интерферометра определяется шириной линии пропускания δk. Две линии обычно считаются разрешимыми, когда их максимумы разделены расстоянием, равным ширине линии пропускания:

$$\delta k \le \Delta\xi_m = \xi_m h = \frac{2\pi m}{d} h \quad . \tag{4}$$

Отсюда следует, что для расстояния между зеркалами d = 1 м, ширина линии пропускания с номером m = 1 должна удовлетворять условию $\delta k \le 6.28 \cdot 10^{-23}$ см$^{-1}$.

Основными параметрами, влияющими на чувствительность интерферометра, являются амплитуда изменения диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon$, толщина кристалла L и длина волны излучения λ.

Изменение расстояния между зеркалами влияет на корреляционную функцию для интенсивностей [10]:

$$F = \left\langle I(\Delta k, \xi_m, d) \middle| I(\Delta k, \xi_m, d + \Delta d) \right\rangle . \tag{5}$$

Как следует из расчетов, высокая контрастность интерференционной картины может быть получена путем настройки интерферометра на измерение корреляционной функции интенсивностей излучения от двух плеч интерферометра Майкельсона, соответствующих ненулевым резонансным модам с $m \neq 0$.

Выводы

Таким образом, использование резонаторов Фабри-Перо с периодическими структурами в качестве отражающих зеркал позволяет значительно уменьшить размеры системы (расстояние между зеркалами может составлять всего несколько метров). Метод, основанный на измерении корреляционной функции интенсивностей резонансных мод ненулевого порядка от двух плеч интерферометра Майкельсона, позволяет получить разрешение, достаточное для регистрации гравитационных волн. Показано, что разрешение интерферометра порядка $\delta k = 10^{-23}$ см$^{-1}$ может быть получено при расстоянии между зеркалами d = 1 м. Чувствительность такого интерферометра к малым перемещениям отражающих структур относительно друг друга превышает чувствительность системы LIGO.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-11026.

Список литературы

1. Gertsenshtein M.E., Pustovoit V.I. On the detection of low frequency gravitational waves // Sov. Phys. JETP. 1963. V. 16. No. 2. P. 433-435; ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 605-607.
2. Abbott B.P., et.al. (LIGO Scientiéc Collab.,Virgo Collab.). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger // Phys. Rev. Lett. 2016. V.116, 061102.
3. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, "GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence // Phys. Rev. Lett. 2016. V.116. 241103.
4. Pustovoit V.I. On the direct detection of gravitational waves // Phys. Usp. 2016. V. 59. P. 1034–1051.
5. Braginskii V.B. Gravitational-wave astronomy: new methods of measurement // Phys. Usp. 2000. V. 170. P. 743-752.
6. Afanas'ev A.M., Gulyaev Yu.V., and Pustovoit V.I. An increase in the spectral resolution of diffraction filters due to destructive interference // Journal of Communications Technology and Electronics. 2004. V. 49 C. 1526-1531.
7. Petrov N.I. and Pustovoit V.I. Acousto-optical resonator with ultra-narrow bandwidth // Las. Phys. Lett. 2017. V. 14. No.11. 115702.
8. Petrov N.I. and Pustovoit V.I. Acousto-optical properties of heterogeneous media with a nonuniform distribution of nanoparticles // JETP Lett. 2019. V.109. P. 18-23.
9. Pustovoit V.I. Fabry-Perot resonator with periodic structures as reflecting mirrors being a basis for gravity waves detection // Doklady Phys. 2006. V. 407. No. 4. P. 472-477.
10. Petrov N.I., Pustovoit V.I. Small-Sized Interferometer with Fabry-Perot Resonators for Gravitational Wave Detection // Frontiers in Optics/Laser Science Conference (FiO/LS), USA. 2020. Paper JTh4A.21.

MICHELSON INTERFEROMETER WITH FABRY-PEROT RESONATORS FOR DETECTION OF GRAVITATIONAL WAVES

chief scientist, DSc, Petrov N.I., DSc, Pustovoit V.I.

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS
petrovni@mail.ru

A compact laser interferometer with Fabry-Perot resonators consisting of two spatially distributed "mirrors" for detecting gravitational waves is proposed. The sensitivity of such an interferometer for small movements of mirrors relative to each other exceeds the sensitivity of the LIGO system. A method for detecting gravitational waves is proposed based on the registration of the correlation function of the radiation intensities of non-zero-order resonant modes from the two arms of the Michelson interferometer.

Keywords: Michelson interferometer, Fabry-Perot resonator, filter resolution, sensitivity of the interferometer

ПРИЧИНА УШИРЕНИЯ ЛИНИИ ГЕНЕРАЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ С ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАКАЧКОЙ

д. ф.-м. наук Боритко С.В.[1], к. ф.-м. наук Балабанов Д.Е.[2]

[1]Научно-технологический центр Уникального приборостроения РАН
[2]Московский физико-технический институт (Государственный Университет)
boritko@mail.ru

Исследованы выходные характеристики наиболее эффективной системы накачки твердотельных лазеров (полупроводниковой), основанной на лазерных диодных линейках. Определен пространственный профиль излучения конкретных диодных линеек. Показано, что основной причиной, приводящей к расширению спектра лазерного излучения, являются наведенные термические эффекты, связанные с пространственной неоднородностью излучения системы полупроводниковой накачки.

Ключевые слова: твердотельные лазеры, полупроводниковая накачка, ширина линии генерации, термические эффекты.

Введение

Как известно, лазерная техника широко вошла в разные аспекты современной жизнедеятельности, и это обусловливает разнообразие требований, предъявляемых к ней. Например, для лазеров, используемых в спектроскопии комбинационного рассеяния (рамановской спектроскопии) [1, 2], наиболее важными характеристиками являются не мощность излучения, а стабильность генерации, предельно малая ширина спектра излучения, высокая пространственная и временная когерентность. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют твердотельные лазеры с полупроводниковой накачкой. Однако при их производстве иногда ширина линии излучения конкретного лазера существенно уширяется. Ниже приведены результаты исследований возможной причины, приводящих к этому уширению.

1. Мотивация и постановка задачи

Так как любое твердое тело состоит из атомов жестко связанных между собой, то для такой системы характерны коллективные колебания с определенным и частотами. Следовательно, если облучать объект с помощью источника света, имеющим одну узкую спектральную линию, то в спектре рассеянного света помимо релевской линии будут существовать линии, имеющие смещенные частоты - линии комбинационного рассеяния. Причем их число, спектральное положение, ширина и интенсивность связаны с составом и структурой рассеивающего объекта. Пример рамановского спектра представлен на рис.1.

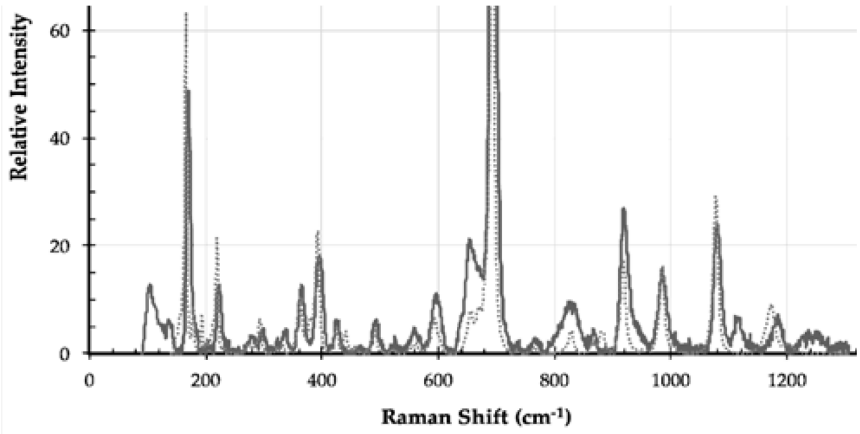


Рис. 1. *Вид типичного рамановского спектра.*

Очевидно, что при уширении спектральной линии источника света линии в рамановском спектре накладываются друг на друга и общая картина комбинационного рассеяния искажается.
В НТЦ УП РАН были изготовлены несколько рамановских спектрометров, в комплект которых в качестве источников излучения входили твердотельные лазеры с полупроводниковой накачкой. При тестировании спектрометров на одном тестовом объекте для одного из них линии комбинационного рассеяния "расползались". При смене излучателя спектр восстанавливался. Встал вопрос: в чем возможная причина уширения линии генерации используемого экземпляра твердотельного лазера и насколько в этом виновата система полупроводниковой накачки.

2. Объекты исследования и экспериментальное оборудование

В качестве объектов исследований были выбраны диодная линейка Silver Bullet ASM06C020 фирмы “NORTHROP GRUMMAN” и диодная линейка аналогичной мощности российского производства (ИРЭ–“Полюс”), предназначенные для накачки активных элементов твердотельных лазеров, извлеченные из систем с неудовлетворительными спектральными выходными характеристиками.

При проведении экспериментов использовался разработанный в НТЦ УП РАН двухкристальный акустооптический спектрометр-флюариметр с рабочим диапазоном 100 – 5000 см$^{-1}$, спектральным разрешением 9 см$^{-1}$. Его оптический блок содержит пару последовательно расположенных перестраиваемых акустооптических фильтров изготовленных из кристаллов $CaMoO_4$, в которых с помощью ультразвуковой волны создается объемная дифракционная решетка, осуществляющая селекцию заданной спектральной составляющей оптического излучения. В состав каждого фильтра входят входной и выходной поляризаторы, обеспечивающие выделение указанной спектральной компоненты. Такой подход обеспечивает высокий контраст и не требует (хотя и не исключает) применения режекционных фильтров. Принципиальная конструкция акустооптических ячеек подробно описана в [3]. Отфильтрованное излучение попадает на охлаждаемый термоэлектрическим элементом ФЭУ, сигнал с которого поступает на устройство оцифровки, которое пересылает полученную информацию через последовательный порт в компьютер и принимает из компьютера информацию для задания параметров спектрометра и управления монохроматором. При этом синтезатор генерирует ВЧ сигнал, задаваемой устройством управления частоты, который через усилитель мощности поступает на пьезопреобразователи акустооптических ячеек. Датчик температуры, расположенный на корпусе одной из акустооптических ячеек, позволяет производить коррекцию частоты ультразвука для поддержания длины волны выделяемого излучения при изменении температуры ячеек. В качестве фотоприемника используется ФЭУ R2946 фирмы «Hamamatsu», имеющий высокую чувствительность и широкий спектральный диапазон: от ультрафиалета до 890 нм.

3. Экспериментальные исследования

Двухрядная диодная линейка Silver Bullet ASM06C020. В первую очередь была исследована интенсивность излучения накачки на длине волны 810 нм (частота максимальной интенсивности излучения диодов, составляющих линейку) в разных точках по длине линейки. Оказалось, что распределение интенсивности излучения неравномерно - имеется ярко выраженный провал в центральной части. Можно предположить, что этот эффект связан с уходом максимумов излучения отдельных диодов по частоте из-за разного температурного режима работы центральной и боковых частей линейки. Однако проверка этой гипотезы (регистрация спектров излучения в разных точках диодной линейки) показала, что все 49 излучательных элемента диодной линейки имеют идентичные спектральные характеристики и, следовательно, создают равномерное излучение накачки по всей длине.

Далее были проведены исследования распределения интенсивности излучения в зависимости от угла относительно продольной плоскости, т.е. пространственные зависимости излучения диодной линейки в характерных точках, а именно по краям и в центре. Результаты измерений представлены на рис.2, пунктирные линии описывают угловое распределение интенсивности излучения на расстоянии 1,5 мм от краев линейки, сплошная линия – в центральной ее части.

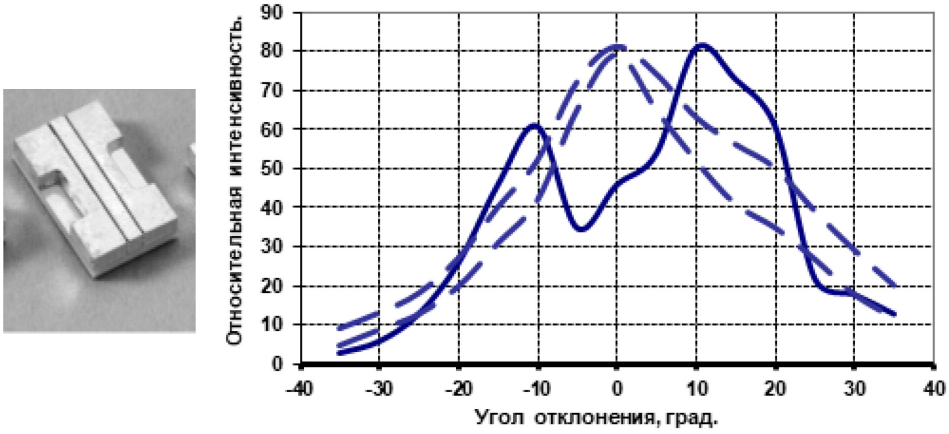


Рис. 2. *Угловые распределения интенсивности излучения в характерных точках: в центральной части (сплошная линия) и по краям (пунктир).*

Из рисунка видно, что в центре имеется ярко выраженная седлообразная форма направленности излучения. Таким образом, на продольной оси, в центральной части мы имеем как бы два источника, излучающих под углом друг к другу.

Однорядная диодная линейка производства ИРЭ–“Полюс”. Сначала, как и в предыдущем случае, были исследованы частотные характеристики излучения в разных точках вдоль диодной линейки. Оказалось, что, во-первых, спектры излучения всех элементов линейки схожи, и, во-вторых, значения максимумов излучения в разных точках по длине линейки практически одинаковы. Затем, были проведены исследования пространственного распределения максимума излучения линейки, т.е. в зависимости от угла

отклонения от вертикали. Результаты измерений в одной из точек по длине линейки приведены на рис. 3. Видно, что картина распределения излучения несимметрична, причем максимум излучения направлен под углом порядка 10° к вертикали.

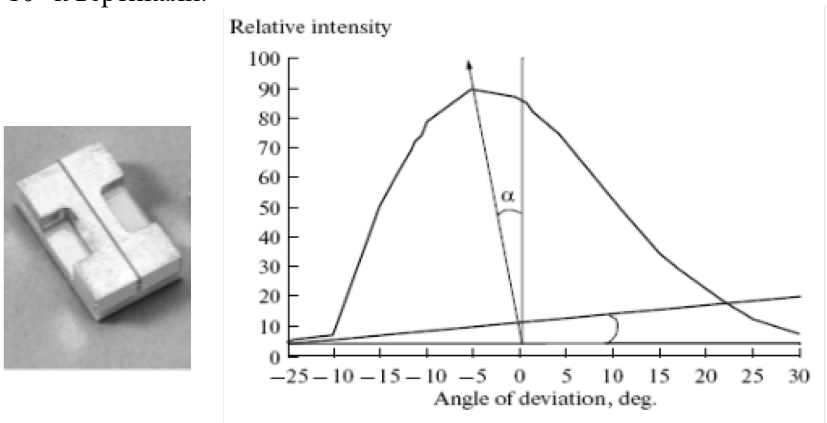


Рис. 3. *Распределение максимума излучения линейки в зависимости от угла отклонения от вертикали.*

Выводы

Таким образом, обе исследованные диодные линейки обладают несимметричным в пространстве распределением излучения. Рассмотрим, к чему это может привести. Пусть имеется идеальный активный элемент и осуществляется, например, поперечная накачка по всей боковой поверхности активного элемента. Хорошо известно, что даже для иттербиевых лазеров, у которых полосы поглощения и люминесценции достаточно близки, около 11% мощности накачки все таки трансформируется в тепло (для неодимовых лазеров этот показатель достигает 37%). Следовательно, если излучение накачки несимметрично в пространстве, то одна часть активного элемента по поперечному сечению будет получать больше световой энергии, что приведет к локально неравномерному нагреву активного элемента. Это в свою очередь приведет к возникновению в нем тепловой линзы [4] и наведенного двулучепреломления [5,6] (индуцируются термические абберации, фазовые искажения и тепловая фокусировка). Поэтому говорить о возможности получения одномодовой, одночастотной генерации с малой шириной спектра излучения при такой накачке не приходится.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ - Грант № 18-07-00089 а.

Список литературы

1. Landsbergand G., Mandelstam L. A novel effect of light scattering in crystals // Naturwissenschaften. №16. 1928. С.557.
2. Raman C.V., Krishnan K.S. A new type of Secondary Radiation // Nature. № 121. March 31, 1928. C.501.
3. Мазур М.М., Шорин В.Н., Абрамов А.Ю. и др. Спекторметр с двойным оптическим монохроматором // Оптика и спектроскопия. Т.81. № 3. 1996. С. 521.
4. Тарасов Л.В. Физика лазера. 2-е изд. М.: Либроком, 2010.
5. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990.
6. Шестаков А. Оптические элементы // Фотоника. № 5. 2007. С. 30.

THE REASON FOR THE BROADENING OF THE GENERATION LINE OF SOLID-STATE LASERS WITH SEMICONDUCTOR PUMPING

doctor Boritko S.V.[1], Ph. D., associate Professor Balabanov D. E.[2]

[1]Scientific and technological center of Unique instrumentation of the RAS
[2]Moscow Institute of Physics and technology (State University)
boritko@mail.ru

The output characteristics of the most efficient solid-state laser pumping system (semiconductor) based on laser diode rulers are studied. The spatial radiation profile of specific diode lines is determined. It is shown that the main reason for the expansion of the laser radiation spectrum is induced thermal effects associated with the spatial no uniformity of the radiation of the semiconductor pumping system.

Keywords: solid-state lasers, semiconductor-pumped system, the line width of generation, thermal effects.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ПУЧКА ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРА В ЯЧЕЙКЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

м.н.с. Булатов К.М.[1], студент Храмов Н.А.[2],
к.т.н. Носов П. А.[2], к. ф.-т. наук Зинин П.В. [1]

1Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
2МГТУ им. Н.Э. Баумана
pan@bmstu.ru, zosimpvz@mail.ru

Проведено исследование параметров фокусирующей лазерной оптической системы, формирующей пучок в ячейке высокого давления с алмазной наковальней. Определены параметры оптической системы лазерного нагрева образцов в ячейке с алмазной наковальней, при которых на гранях алмаза обеспечивается допустимая лучевая нагрузка.

Ключевые слова: лазерная оптическая система, лазерный нагрев, ячейка высокого давления

1. Введение

Неотъемлемой частью установок высокотемпературного нагрева ($T > 1200$ K) при высоких давлениях (P>20 ГПа) являются: (1) мощный лазер; (2) формирующая оптическая система; (3) алмазная наковальня; (4) изображающая оптическая система; (5) устройство бесконтактного измерения температуры. В работе приведены результаты моделирования оптической схемы системы лазерного нагрева образцов в ячейке высокого давления, в которой система лазерного нагрева и оптическая система измерения распределения температуры разделены. Показано, что установка с разделёнными системами нагрева и измерения температуры позволяет: (1) проводить юстировку оптической системы измерения температуры независимо от юстировки ИК лазера; (2) получить оптимальное пятно ИК лазера и в будущем управлять пучком с использованием подвижной линзы и акустооптического дефлектора.

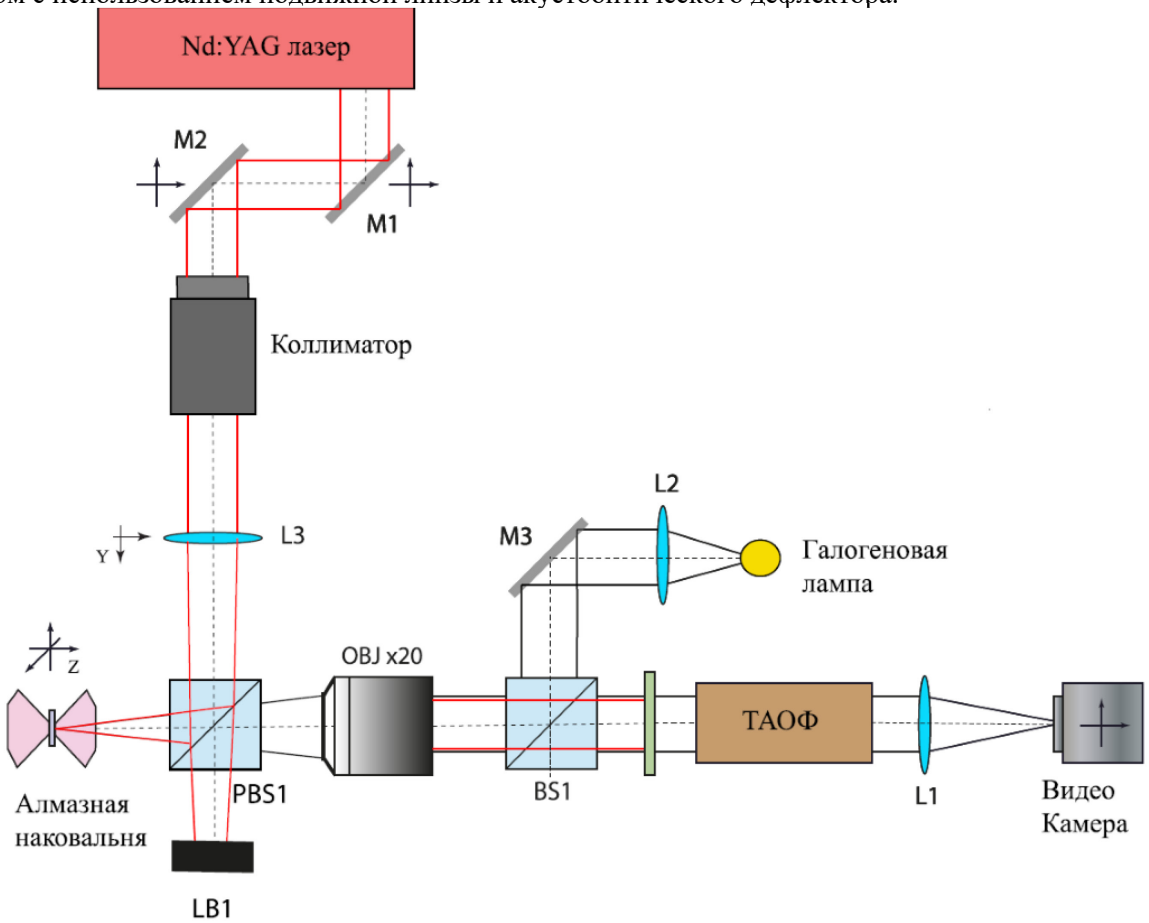


Рис. 1. *Схема установки лазерного нагрева в ячейке высокого давления с использованием акустооптического фильтра*

2. Результаты исследований

В Научно-технологическом центре уникального приборостроения РАН разработана и создана уникальная установка по лазерному нагреву в ячейках высокого давления, позволяющая измерять распределение температуры [1,2] и коэффициента излучения при высоких давлениях и температурах [3]. В этой установке используется тандемный акустооптический фильтр (ТАОФ), применение которого обосновано в работах [4,5]. Он позволяет получать гипперспектральные данные на основе которых получается в том числе и распределение температуры. Интенсивность каждой точки спектрального изображения пропорциональна интенсивности излучения соответствующей точки нагретого тела. Набор спектральных изображений, полученных в диапазоне 650–1000 нм [6], позволяет вычислить зависимость интенсивности излучения каждой точки нагретого объекта от длины волны. Определение пространственного распределения температуры объекта T(x,y) осуществляется путем аппроксимации в каждом пикселе по критерию наименьших квадратов полученной зависимости I(x,y,λ) кривой Планка [7]. Данная установка рис. 1 состоит из двух модулей: система лазерного нагрева, изображающая оптическая система.

В нашей установке нагревание образца проводится излучением непрерывного волоконного YAG:Nd ИК лазера ЛК-200-ОМ-В компании IPG со следующими характеристиками: длина волны излучения $\lambda = 1{,}07$ мкм, максимальная мощность 200 Вт, параметр качества пучка $M^2 = 1{,}06$, радиус перетяжки по уровню интенсивности $1/e^2 \cdot h_w = 29{,}64$ мкм, угловая расходимость по уровню $1/e^2 \cdot 2\theta = 24{,}31$ мрад, длина Рэлея $z_c = 2{,}44$ мм (рис. 1). Для пространственных параметров лазерного гауссова пучка выполняется инвариант [8-10]:

$$h_w\theta = h^2 wzc = M^2\lambda\pi = 0{,}36\ мм{\cdot}мрад.$$

В ходе моделирования в Zemax рассматривалась фокусировка гауссова пучка лазера ЛК-200-ОМ-В с вышеперечисленными параметрами пучка при использовании линзы L3 со следующими фокусными расстояниями: 30, 40, 50, 100 и 150 мм.

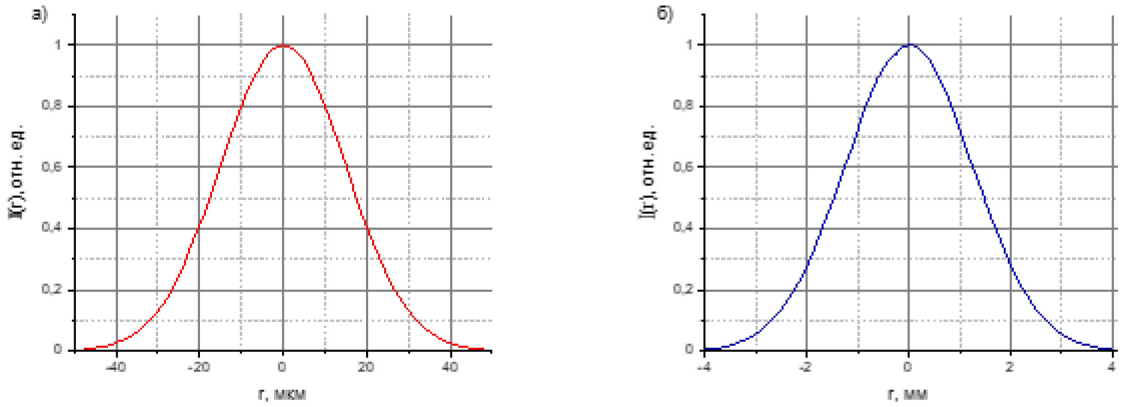


Рис. 2. *Профиль распределения относительной интенсивности I(r) лазерного пучка: а) на выходе лазера ЛК-200-ОМ-В, б) на фокусирующей линзе L3.*

На рис. 2а представлены сечения распределений интенсивности поля на выходе лазера. Для обеспечения необходимого размера лазерного пучка в алмазной наковальне с помощью коллиматора пучок был расширен. В результате сформирован квазипараллельный лазерный гауссов пучок с радиусом перетяжки по уровню интенсивности $1/e^2 \cdot h_w = 2{,}5$ мм (рис. 2 б) и угловой расходимостью $2\theta = 0{,}58$ мрад. Далее этот пучок фокусируется линзой L3 (рис. 1). Размер пучка на образце в алмазной наковальне определяется фокусным расстоянием фокусирующей линзы L3 и положением линзы относительно поверхности алмаза. Фактическое положение перетяжки сфокусированного пучка смещается из-за того, что гауссов пучок проходит через среды алмаз-образец. Диаметр перетяжки сфокусированного пучка одинаковый как в воздухе, так и в среде и равен [9]:

$$2h'_w = \frac{4M^2\lambda}{\pi 2h_L} f' \qquad (1)$$

В нашей оптической системе для сопряжения с апертурой линзы L3 пучок был расширен и колимирован $2h_L = 5$ мм

Сначала линза L3 устанавливается таким образом, что излучение фокусируется на поверхность алмаза. Для фокусирования ИК лазера на образце в алмазной наковальне необходимо переместить линзу L3. Величина перемещения линзы z определяется формулой [10]:

$$z = -\left(\frac{d_1}{N_1} + \frac{d_2}{2N_1N_2}\right), \qquad (2)$$

где d_1 – толщина алмаза (в нашей схеме $d_1 = 2,5$ мм), d_2 – толщина термоизоляционного слоя, (в нашей схеме $d_2 = 20$ мкм, а слой приготовлен из NaCl), $N_1 = n_2 / n_1$, $N_2 = n_3 / n_2$, $N_2 = n_3 / n_1$ – относительные показатели преломления сред, n_1 – показатель преломления воздуха, n_2 – показатель преломления алмаза ($n_2 = 2,4$), n_3 – показатель преломления соли ($n_3 = 2$).

Подставляя в (2) параметры алмазной наковальни, получим $z = -1,05$ мм. При фокусном расстоянии фокусирующей линзы 40 мм диаметр гауссова пучка по уровню $1/e^2$ на поверхности алмаза равен 132 мкм, на образце 12 мкм

После этого фокусирующая линза L3 смещается на Δz. При отрицательном Δz фокусирующая линза смещается к алмазной наковальне, а при положительном – от нее.

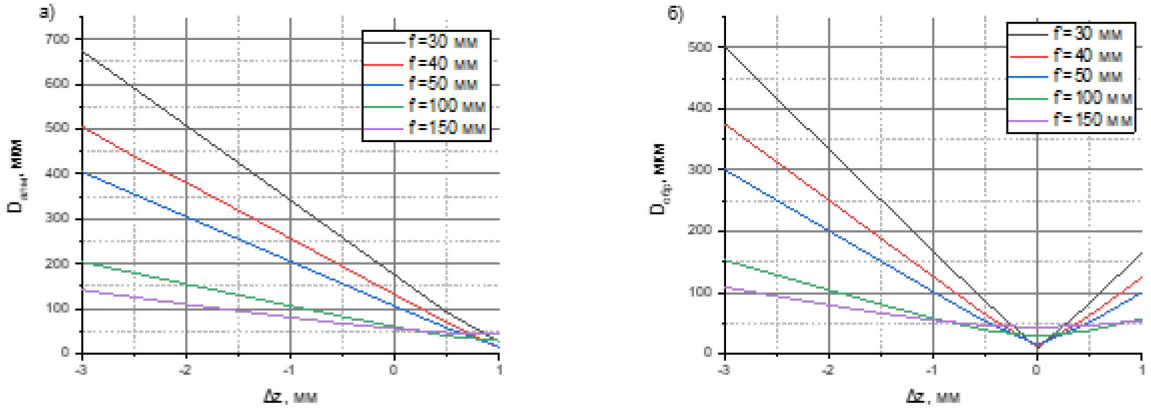


Рис. 3. *Зависимости диаметра пучка от смещения Δz линзы L3 на: (а) поверхности алмаза $D_{алм}$, (б) образце $D_{обр}$.*

Из зависимостей на рис. 3а видно, что линза с фокусным расстоянием 150 мм создает наибольшее пятно нагрева в фокусе (~44 мкм). К сожалению, приблизительно пятно с таким же диаметром (~50 мкм) создается на поверхности алмаза. Алмазы, используемые в наковальнях, как правило, прозрачны для ИК излучения. Однако попадание мощного лазерного излучения на пылинки на поверхности алмаза могут привести к его повреждению. Поэтому представляется важным сделать пятно ИК лазера на поверхности алмаза как можно большего диаметра. Анализ результатов, представленных на рис. 4, показывает, что оптимальным решением представляется использование линзы с фокусным расстоянием 40 мм. Опыт показывает, что установка линза с меньшим фокусным расстоянием в 30 мм невозможна из-за геометрии данной установки. Для линзы с фокусным расстоянием 40 мм при промежуточной дефокусировке $\Delta z = -0,7$ мм диаметр ИК лазера на поверхности алмазе равен 217 мкм (рис. 3а), в тоже время диаметр ИК лазера на образце составляет 85 мкм (рис. 3б).

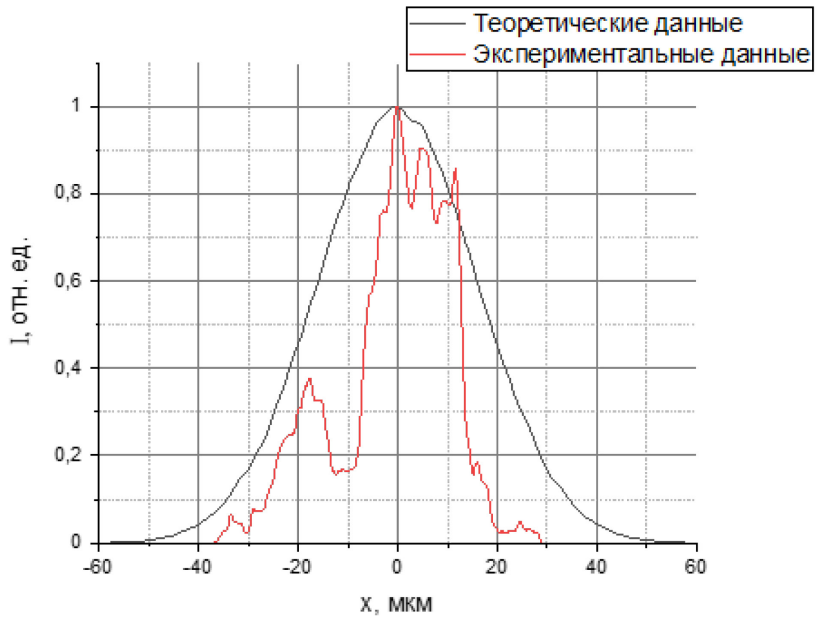


Рис. 4. *Распределение интенсивности поля лазерного пучка.*

Таким образом, разделение системы нагрева и системы измерения температуры, использование фокусирующие линзы с фокусным расстоянием в 40 мм и её перемещение (дефокусировка) позволяют получить оптимально большое пятно ИК лазера на образце (85 мкм). В этом случае интенсивность потока лазерного излучения на образце более существенно уменьшается.
Также были проведены экспериментальные исследования на установке, схема которой представлена на рис. 1. В качестве образца использовалось плоское зеркало. В близи плоскости фокусировки линзы теоретическое и экспериментальное распределения интенсивности поля совпадают. При значительном удалении от плоскости фокусировки экспериментальное распределение интенсивности поля существенно отличается от гауссова распределения. Сравнение теоретического и экспериментального распределений интенсивности поля при $\Delta z = -0,5$ мм представлено на рис. 4.

Заключение

В работе рассмотрена схема лазерной оптической системы нагрева образцов в ячейке высокого давления, в которой система лазерного нагрева и оптическая система измерения распределения температуры разделены. Проведено моделирование фокусировки пучка ИК лазера в ячейке высокого давления в предложенной оптической системе для линз с фокусным расстоянием 30…150 мм.
Сравнение результатов исследований показало, что в близи плоскости фокусировки интенсивность поля имеет гауссово распределение.

Список литературы

1. Bulatov, K.M., Y.V. Mantrova, A.A. Bykov, M.I. Gaponov, P.V. Zinin, et al., Multi-spectral image processing for the measurement of spatial temperature distribution on the surface of the laser heated microscopic object. Comput. Opt., 2017. 41(6): 864.
2. Bykov, A.A., I.B. Kutuza, P.V. Zinin, A.S. Machikhin, I.A. Troyan, et al., Combined laser heating, and tandem acoustooptical filter for 2-D temperature distribution on the surface of the heated microobject. Journal of Physycs:. Conference Series, 2018. 46
3. Zinin P V, Bykov A A, Machikhin A S, Troyan I A, Bulatov K M, Mantrova Y V, Batshev V I, Gaponov M I, Kutuza I B, Rashchenko S V, Prakapenka V B, and Sharma S K High Pres. Res. 39 (1) 131 (2019) .
4. Machikhin, A.S., P.V. Zinin, A.V. Shurygin, D.D. Khokhlov, Imaging system based on a tandem acousto-optical tunable filter for in situ measurements of the high temperature distribution. Optics Letters, 2016. 41(5): 901.
5. Machikhin, A.S., V.I. Batshev, P.V. Zinin, A.V. Shurygin, D.D. Khokhlov, et al., Acousto-optic videospectrometry for measuring the spatial temperature distribution in microobjects. Instruments and Experimental Techniques, 2017. 2: 1.
6. Pustovoit, V.I., V.E. Pozhar, M.M. Mazur, V.N. Shorin, I.B. Kutuza, A.V. Perchik, Double-AOTF spectral imaging system, Acousto-optics and Photoacoustics, Proc. of SPIE, , R. Reibold, V.B. Voloshinov, and A. Sliwinski, Editors. 2005, SPI. p. 59530P1.
7. Machikhin, A.S., P.V. Zinin, A.V. Shurygin, Acousto-optic Imaging System for In-situ Measurement of the High Temperature Distribution in Micron-size Specimens. Physics Procedia, 2015. 70: 733.
8. Пахомов, И.И., А.Б. Цибуля. Расчет оптических систем лазерных приборов. М.: Радио и связь, 1986. - 152 с.
9. Григорьянц, А.Г., Васильцов, В.В., Пространственная структура излучения мощных волноводных лазеров для технологий. Инженерный журнал: наука и инновации, 2012(6):6.
10. Климков, Ю.М., Прикладная лазерная оптика. 1985, Москва: Машиностроение.

SIMULTANEOUS MEASUREMENTS OF THE TWO DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF INFRARED LASER INTENSITY AND TEMPERATURE IN A SINGLE-SIDED LASER-HEATED DIAMOND ANVIL CELL

junior researcher Bulatov K.M.[1], student Khramov N.A.[2],
PhD in Engineering sciences Nosov P.A.[2], PhD in Physico-mathematical sciences Zinin P.V.[1]

[1]Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS
[2]Bauman Moscow State Technical University
pan@bmstu.ru, zosimpvz@mail.ru

A study of the parameters of a focusing laser optical system, which forms a beam in a cell with a diamond anvil, is carried out. The parameters of the optical system of laser heating of samples in a cell with a diamond anvil, at which the permissible radiation load is provided on the diamond faces, are determined.

Keywords: laser optical system, laser heater, diamond anvil cell

ВИДЕОЭНДОСКОПИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

м.н.с. Хохлов Д.Д., м.н.с. Горевой А.В.,
в.н.с., д.т.н., Мачихин А.С., д.ф.-м.н., Пожар В.Э.

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
khokhlov.dd@ntcup.ru

Эндоскопические методы контроля являются неотъемлемой частью промышленного неразрушающего контроля и медицинской диагностики. В работе описаны схемы компоновки и подходы к проектированию эндоскопических приборов для бесконтактных спектральных и геометрических измерений. Предложенные подходы апробированы при разработке опытных образцов.

Ключевые слова: видеоэндоскопия, видеоспектрометрия, неразрушающий контроль, эндоскопическая диагностика

Введение

В современной промышленности неразрушающий контроль труднодоступных элементов является обязательной процедурой при производстве и испытаниях многих технических объектов. Неразрушающие методы позволяют проводить контроль состояния авиационных и ракетных двигателей, турбин, котлов и теплообменников без их разборки, что сокращает время их простоя при проведении регламентных работ. Целью контроля труднодоступных полостей является анализ состояния их поверхности, направленный на выявление дефектов и оценки степени их опасности. В медицинских исследованиях малоинвазивная диагностика широко применяется для выявления и анализа состояния патологий внутренних органов и тканей человека и животных. К ключевым методам анализа состояния труднодоступных внутренних полостей в промышленности и медицине относятся оптические методы, основным инструментом осуществления которых является эндоскопическая техника.

Эндоскопический зонд формирует доступное для наблюдения в окуляре или на мониторе изображение объекта. Возможности современных эндоскопических приборов расширяются за счет внедрения технических решений, позволяющих не только наблюдать изображение, но и анализировать бесконтактными методами физико-химические свойства объекта, а также получать цифровые трехмерные изображения участков его поверхности и проводить геометрические измерения. Настоящая работа направлена на разработку, апробацию и внедрение методов измерительной эндоскопии, а также разработку приборов, реализующих данные методы.

1. Основные схемы компоновки эндоскопических видеоспектрометров

Интенсивность излучения объекта на некоторой длине волны связана с его физико-химическими характеристиками и структура изображения, полученного на этой длине волны, отражает пространственное распределение этих характеристик. Поэтому в эндоскопических системах важной является возможность анализа спектральных свойств излучения объекта, а также пространственного распределения этих свойств. Изображающие спектрометры (видеоспектрометры) являются многофункциональными инструментами анализа в реальном времени, применимыми для этих целей.

Основным элементом видеоспектрометра является перестраиваемый фильтр, обеспечивающий спектральную селекцию излучения при сохранении пространственной структуры изображения. Акустооптические фильтры (АОФ) обладают высоким спектральным и пространственным разрешением, а также обеспечивают быструю произвольную спектральную адресацию. Компактность и отсутствие подвижных элементов являются достоинствами акустооптических устройств, позволяющими создавать на их основе портативные видеоспектрометры, в том числе эндоскопические. Последовательная перестройка акустооптического фильтра по длине волны и регистрация изображений, соответствующих выбранным длинам волн, позволяет сформировать массив спектральных изображений, содержащий информацию о пространственном распределении спектральных свойств исследуемого объекта в поле зрения эндоскопического прибора.

Авторами подготовлены рекомендации по выбору схемы эндоскопического видеоспектрометра [1]. В зависимости от решаемой практической задачи, перестраиваемый фильтр предлагается устанавливать в системе подсветки эндоскопического прибора или в его изображающем канале.

2. Эндоскопический видеоспектрометрический модуль

Разработанный авторами эндоскопический модуль для неразрушающего контроля построен по схеме с размещением спектрального элемента в изображающем канале [2].

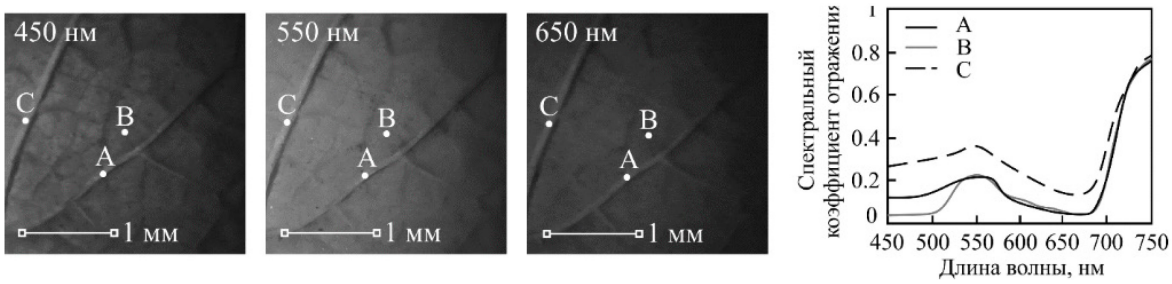
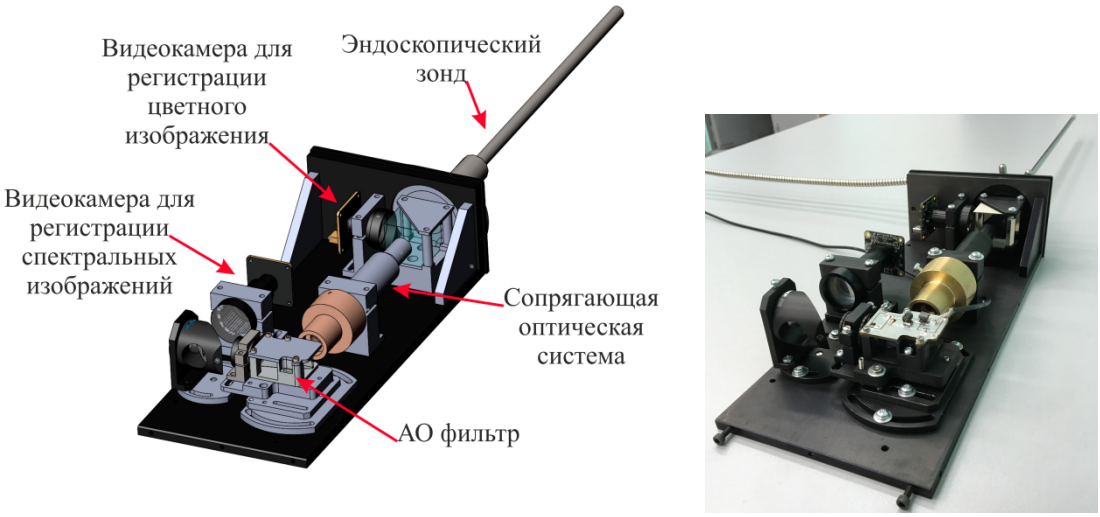


Рис. 1. *Примеры спектральных изображений, полученных при помощи эндоскопического видеоспектрометрического модуля и спектры отражения, полученные для обозначенных точек изображения.*

Наличие в составе модуля спектрального и широкополосного каналов делает возможным одновременное получение цветного широкополосного изображения и спектральных узкополосных изображений. Цветное изображение при этом используется для определения зоны контроля и наведения на предполагаемый дефект, а узкополосные изображения задействованы для спектральной визуализации и спектральных измерений. Примеры спектральных изображений на длинах волн 450, 550 и 650 нм приведены на рис. 1. Конструкция модуля обеспечивает его совместимость с различными эндоскопическими зондами, оснащенными стандартным окуляром. Внешний вид модуля показан на рис. 2.



а) б)

Рис. 2. *Трехмерная модель (а) и внешний вид без защитного кожуха (б) эндоскопического видеоспектрометрического модуля.*

3. Стереоскопический видеоэндоскоп

Для видеоэндоскопических зондов, у которых матричный приемник излучения расположен в дистальной части, установка перестраиваемого спектрального фильтра в изображающем канале затруднительна из-за малого диаметра зонда. В таком случае целесообразно осуществлять спектральную фильтрацию в канале подсветки. При использовании перестраиваемого источника света со стереоскопическим видеоэндоскопом становится возможным совместить измерение трехмерных геометрических параметров объекта стереоскопическим методом и спектральных свойств его поверхности. Для реализации стереоскопического метода в малых габаритах дистальной части зонда используются призменно-линзовые оптические системы (ОС), которые позволяют одновременно получать изображения объекта с разных ракурсов на одном матричном приемнике излучения. Призменные элементы вносят значительную дисторсию и хроматические аберрации. Коррекция этих искажений за счет цифровой обработки становится актуальной при проведении спектральных измерений. Выпускаемые серийно измерительные видеоэндоскопы не допускают модификацию аппаратной части или программного обеспечения и не дают возможность оценки погрешности геометрических измерений, что послужило причиной для разработки новой эндоскопической измерительной системы.

На основе предложенных авторами методов и алгоритмов компьютерного моделирования ОС разработаны программные модули, которые могут быть встроены в системы автоматизированного проектирования (САПР) ОС (Zemax, CODE V и др.), и методика проектирования зондовых стереоскопических систем. Это обеспечивает одновременное проведение аберрационного анализа и анализа погрешности геометрических измерений, а также оптимизацию ОС и анализ влияния допусков [4]. Методика проектирования апробирована при разработке зондовой системы, для которой осуществлен оптимальный выбор математической модели и оптимизированы процедура и оборудование для калибровки. Для

снижения погрешности геометрических измерений в узких спектральных диапазонах предложена методика калибровки стереоскопической системы, учитывающая спектральные зависимости её калибровочных параметров [5]. Разработан измерительный стереоскопический видеоэндоскоп (рис. 3).

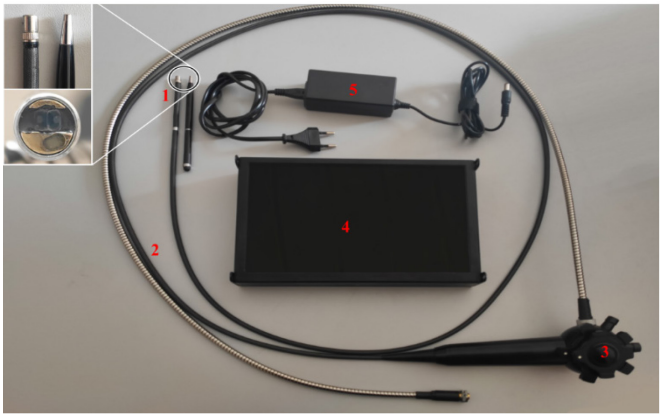


Рис. 3. *Внешний вид стереоскопического видеоэндоскопа: 1 – дистальная часть, 2 – гибкая рабочая часть, 3 – проксимальная часть с органами управления артикуляцией, 4 – базовый блок, 5 – зарядное устройство.*

Выводы

Описанные в работе подходы к проектированию эндоскопических приборов апробированы при разработке эндоскопического видеоспектрометрического модуля и стереоскопического видеоэндоскопа со спектрально-селективным источником света. Системное применение предложенных подходов позволит создавать многофункциональные эндоскопические устройства, результатом внедрения которых станет повышение информативности эндоскопического контроля и диагностики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-29-03469.

Список литературы

1. Khokhlov D.D., Machikhin A.S., Batshev V.I., Gorevoy A.V., Pozhar V.E. Endoscopic spectral imagers based on acousto-optic filtration of light. // Proc. SPIE. V. 11210. № 112100D. 2019.
2. Мачихин А.С., Хохлов Д.Д., Батшев В.И, Пожар В.Э. Акустооптический эндоскопический модуль для неразрушающего контроля. // Известия РАН. Серия физическая. Т. 82. № 11. 2018. С. 1541-1544.
3. Machikhin A.S., Gorevoy A.V., Khokhlov D.D., Batshev V.I. 3D imaging endoscopy using small-size prism-based stereo systems. // Proc. SPIE. V. 11433. № 114331X. 2020.
4. Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Khokhlov D.D., Batshev V.I. Optimization of prism-based stereoscopic imaging systems at the optical design stage with respect to required 3D measurement accuracy. // Optics Express. V. 28. № 17. 2020. P. 24418-24430.
5. Machikhin A.S., Gorevoy A.V., Khokhlov D.D. and Kuznetsov A.O. Modification of calibration and image processing procedures for precise 3-D measurements in arbitrary spectral bands by means of a stereoscopic prism-based imager. // Optical Engineering. V. 58. № 3. 2019. 033104.

VIDEO ENDOSCOPES FOR SPECTRAL AND GEOMETRICAL MEASUREMENTS

junior researcher Khokhlov D.D., junior researcher, Gorevoy A.V., PhD, Machikhin A.S., PhD, Pozhar V.E.

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences
khokhlov.dd@ntcup.ru

Endoscopic methods are an integral part of industrial non-destructive testing and medical diagnostics. The design approaches of the endoscopic devices for remote spectral and geometric measurements are proposed. The mentioned approaches have been tested during the prototype development.

Keywords: video endoscopy, spectral imaging, nondestructive testing, endoscopic diagnosis

ФИЛЬТР НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ НАНОЧАСТИЦ В РЕЗОНАТОРНОМ СЛОЕ

г.н.с., д.ф.-м.н., Петров Н.И.

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
petrovni@mail.ru

Исследован пространственно-частотный тонкопленочный фильтр с нарушенным полным внутренним отражением (НПВО) с включениями наночастиц, работающий в видимом спектральном диапазоне. Анализируется влияние наночастиц, внедренных в слой резонатора, с учетом частотной дисперсии. Показано, что дисперсия приводит к расщеплению полосы пропускания фильтра и пространственному расщеплению падающего пучка на три разделенных по углу выходных пучка.

Ключевые слова: НПВО фильтр, частотная дисперсия, наночастицы, расщепление полосы пропускания

Введение

Вследствие интерференции волн при туннелировании через систему барьеров могут возникать резонансные эффекты. Резонансные туннельные эффекты, являющиеся оптической аналогией квантово-механического туннелирования, нашли применение в перспективных областях прикладной и экспериментальной физики, включая интегральную и волоконную оптику, перенос электронов в твердотельных сверхрешетках и НПВО-спектроскопию. В настоящее время существуют различные типы устройств, таких как фильтры, поляризаторы и светоделители, основанные на интерференции света и НПВО эффекте в тонких пленках.

НПВО фильтр был впервые предложен в 1947 году Лейгенсом и Тернером [1]. Это устройство, которое использует резонансное туннелирование света через плоский диэлектрический оптический волновод, зажатый между двумя тонкими пленками с низким показателем преломления, которые действуют как потенциальные барьеры. Теория НПВО эффекта представлена в работах [2, 3]. Последние достижения в технологии привели к появлению диэлектрических тонких пленок с экстремальной точностью толщины и низкими потерями поглощения и рассеяния. Пространственно-частотная фильтрация широко используется для улучшения изображения в системах цветной визуализации, устройствах цветного отображения и т.д. В [4] было предложено устройство для пространственного разделения падающего белого пучка света на три цветовых пучка. Хорошо установлено, что структуры НПВО обнаруживают пики пропускания под определенными углами и длинами волн, которые очень чувствительны к параметрам призм и встроенных слоев. В работе [5] было показано, что при измерении спектральных характеристик НПВО-фильтров расходимость падающего светового пучка не должна превышать некоторого предельного значения, которое не превышает нескольких угловых минут. Однако влияние частотной дисперсии на процесс НПВО ранее не рассматривалось.

В данной работе теоретически исследовано влияние аномальной частотной дисперсии, вызванной металлическими наночастицами, внедренными в резонаторный слой фильтра НПВО, на резонансное пропускание света.

1. НПВО фильтр

Схематическая модель фильтра представлена на рис. 1.

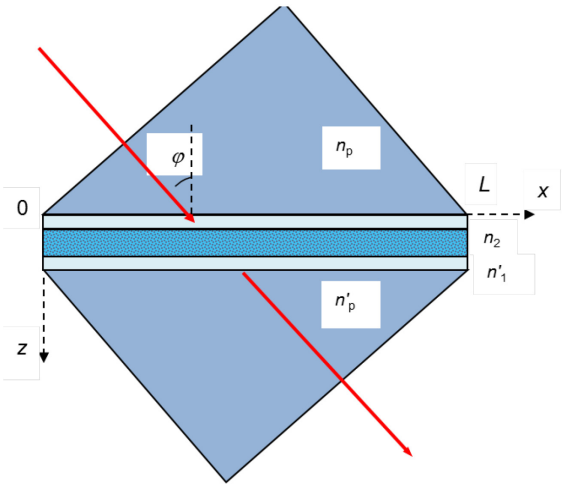


Рис. 1. *НПВО фильтр с включениями наночастиц в центральном слое.*

Устройство состоит из трехслойной структуры, размещенной между двумя призмами с показателями преломления n_p and n'_p. Трехслойная структура состоит из высокоиндексного центрального слоя с высоким показателем преломления n_2 и толщиной d_2, зажатого между двумя пленками с низкими показателями преломления n_1 и n'_1, и толщинами d_1 и d'_1, соответственно. Хроматическая и угловая фильтрация падающего светового пучка происходит за счет резонансного дифракционного эффекта при распространении света через неоднородную стратифицированную среду (слоистую структуру), т.е. НПВО эффекта.

2. Условие резонанса

Резонансное условие для s-поляризации с учетом влияния призм определяется уравнением [4]:

$$k'_z d_2 = -\arctan\left[\frac{k'_z(q_z + q'_z)}{q_z q'_z - k'^2_z}\right] - Q_3, \qquad (1)$$

где $Q_3 = 2q_z k'_z (q_z^2 - k_z^2)\exp(-2q_z d_1) / [(q_z^2 + k_z^2)(q_z^2 + k'^2_z)]$, $q_z = (\omega / c)\sqrt{n_p^2 \sin^2\varphi - n_1^2}$, $k_z = (\omega / c)\sqrt{n_p^2 - n_p^2 \sin^2\varphi}$, $q'_z = (\omega / c)\sqrt{n_p^2 \sin^2\varphi - n'^2_1}$, $k'_z = (\omega / c)\sqrt{n_2^2 - n'^2_p \sin^2\varphi}$.

Аналогичные выражения для дифракционной длины и резонансного условия могут быть получены в случае *p*- поляризации.

На рис. 2 представлены угловые распределения интенсивности, соответствующие падающему пучку с длиной волны λ = 570 нм для слоя с наночастицами из серебра.

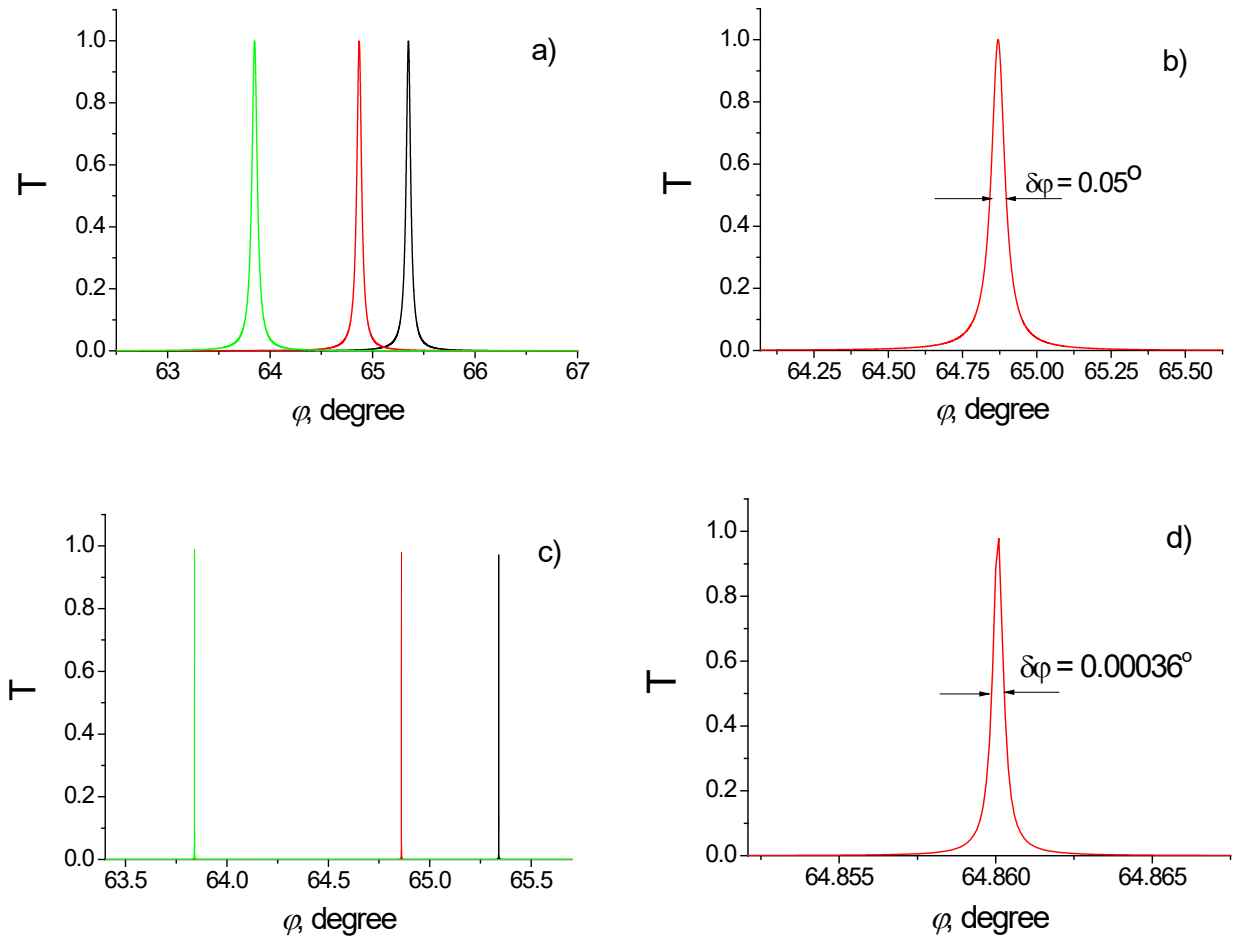


Рис. 2. *Коэффициенты пропускания в зависимости от угла падения при d_1 = 300 nm (a, b) и d_1 = 500 nm (c, d). d_2 =80 nm; λ = 570 nm.*

Из расчетов следует, что угловая расходимость проходящих световых пучков чувствительна к толщинам слоев с низким показателем преломления и уменьшается с увеличением их толщины. Угловые ширины для полосы пропускания $\delta\varphi = 0.05°$ (рис. 2b) и $\delta\varphi = 0.00036°$ (рис. 2d) были получены для d_1 = 300 нм и d_1 = 500 нм, соответственно.

На рис. 3 спектральные кривые для *s*- поляризованного проходящего пучка света показаны для наночастиц из серебра (рис. 3a, b) и золота (рис. 3c, d). Ширины спектральных полос пропускания уменьшаются с увеличением толщины слоя с низким показателем преломления и спектральные линии с шириной $\delta\lambda = 0.013$ нм (рис. 3b) и $\delta\lambda = 0.17$ нм (рис. 3d) были получены при d_1 = 500 нм для слоев из серебра и золота, соответственно. Видно, что для заданного угла падения существуют сразу три резонансные полосы. Это указывает на то, что условие резонанса в резонаторе выполняется сразу для трех длин волн. Это свойство устройства может быть применено в системах визуализации. Заметим, что значительное уменьшение ширины спектральной линии происходит как в результате фотонных, так и плазмонных эффектов.

Отметим, что акустооптические фильтры с включениями метаматериалов, рассмотренные в [6, 7], также обеспечивают сверхузкие спектральные линии за счет резонансной брэгговской дифракции на периодической объемной решетке, создаваемой ультразвуком в кристалле.

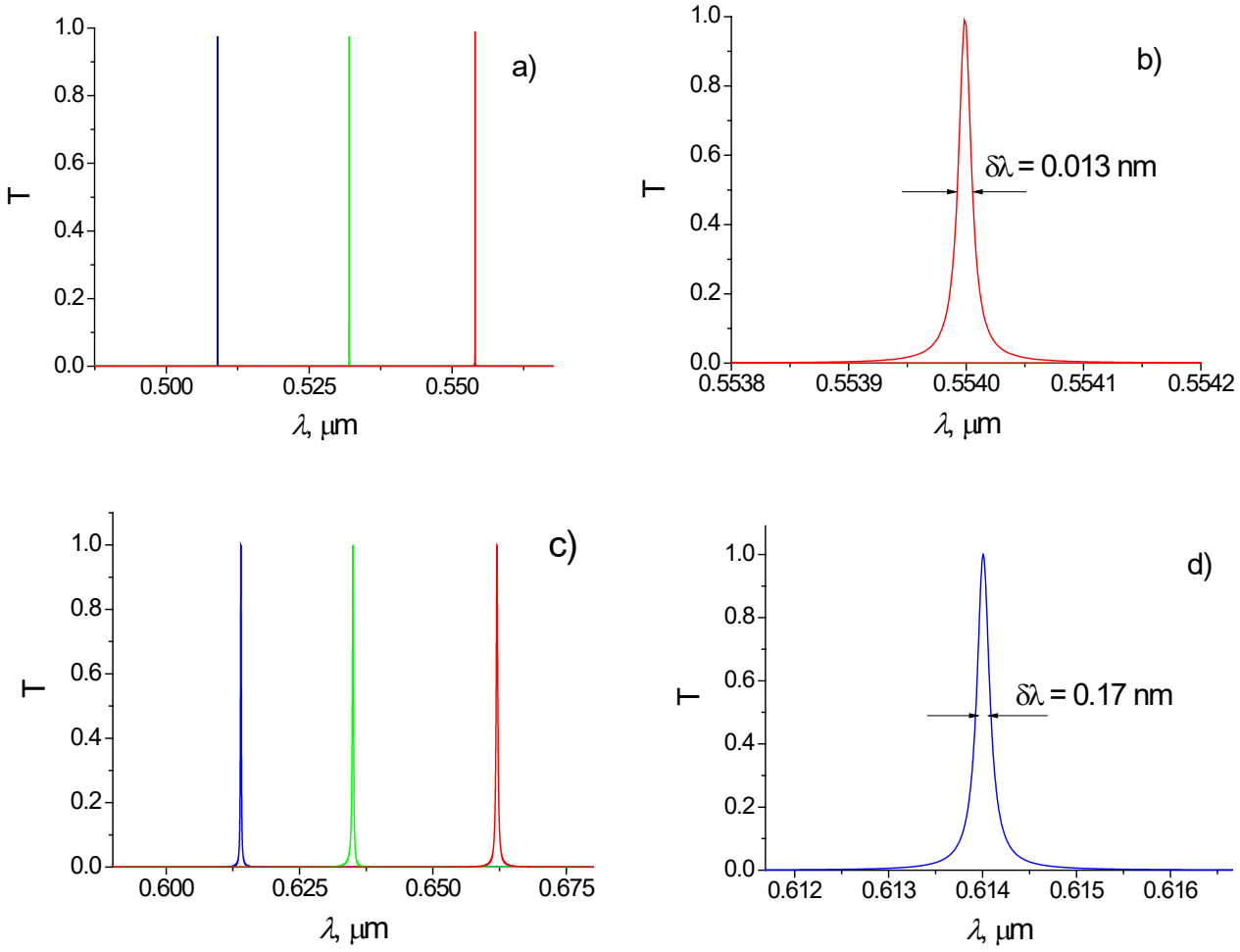


Рис. 3. *Спектральные кривые пропускания:* n_p = 1.85, n_1 = 1.25, n_2 = 2.20, d_1 = 500 nm, d_2 = 70 nm, $\eta = 10^{-3}$. *(a, b) Ag:* $\varphi = 61.4^\circ$ *; (c, d) Au:* $\varphi = 57^\circ$.

Выводы

Таким образом, предложен новый фильтр НПВО, основанный на сочетании фотонного и плазмонного эффектов, приводящих к сужению полосы пропускания и преобразованию спектра пропускания. Показано, что падающий пучок заданной длины волны расщепляется на три разделенных по углам пучка. Показано расщепление полосы пропускания фильтра на три узкополосные спектральные линии для заданного угла падения. Этот тип тонкопленочного светоделителя может быть полезен во многих областях применения, включая область спектроскопии, сенсоры, в спектральных областях, простирающихся от УФ до дальнего ИК диапазона [8]. Отметим, что рассмотренные резонансные туннельные эффекты могут возникать для волн любой природы, в том числе электромагнитных, акустических и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания № 0057-2019-0006.

Список литературы

1. Leurgens P., Turner A.F. Frustrated total reflection interference filters // JOSA. 1947. Vol. 37. P.983.

2. Иогансен Л.В. Резонансная дифракция волн в слоисто-неоднородных средах // ЖЭТФ. 1961. Т. 40. С. 1838-1843.
3. Bergstein L., Shulman C. The Frustrated total reflection filter. I. Spectral analysis // Appl. Opt. 1966. V.5. P. 9-21.
4. Petrov N.I. Frustrated-total-internal-reflection-based thin-film color separator // Opt. Lett. 2007. V.32. P. 2744-2746.
5. Nguen V.B., Gubanova L.A., Bui D.B. Features of the spectral characteristics of narrow-band optical filters with oblique incidence of the radiation beam // Tech. Phys. Lett. 2019. V.45. P.430-432.
6. Petrov N.I., Pustovoit V.I. Acousto-optical resonator with ultra-narrow bandwidth // Laser Physics Letters. 2017. V. **14**. No 11. 115702.
7. Petrov N.I., and Pustovoit V.I. Acousto-optical properties of heterogeneous media with a nonuniform distribution of nanoparticles // JETP Lett. 2019. V.109. P. 18-23.
8. Petrov N.I. Splitting the bandwidth of a frustrated total internal reflection filter with nanoparticle inclusions // OSA Continuum. 2020. V. **3**(9). P. 2591-2601.

FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION FILTER WITH NANOPARTICLE INCLUSIONS IN A RESONATOR LAYER

chief scientist, DSc, Petrov N.I.

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS
petrovni@mail.ru

The frustrated total internal reflection (FTIR) spatial-frequency thin-film filter with metamaterial inclusions operating in a visible spectral range is investigated. Influence of nanoparticles embedded into a resonator layer is analyzed taking into account the frequency dispersion. It is shown that the dispersion causes splitting of the filter bandwidth and spatial splitting of incidence beam into three angularly separated output beams.

Key words: FTIR filter, frequency dispersion, nanoparticles, bandwidth splitting

ЮСТИРОВКА ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ВЫПУКЛЫХ ЗЕРКАЛ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА, РАБОТАЮЩЕГО ПО СХЕМЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ

доцент, к.т.н. Батшев В.И.[1,2], начальник лаборатории Новиков Д.А.[3], м.н.с., асп. Гавлина А.Е.[2], студент Баландин И.А.[1,2]

[1]Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
[2]Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
[3]Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы
batshev@bmstu.ru

Разработана методика юстировки интерферометра, построенного по схеме ортогональных лучей и предназначенного для контроля выпуклых сферических и асферических зеркал. Особенностью интерферометра является отсутствие вспомогательных оптических элементов, размеры которых превышают размеры контролируемого зеркала.

Ключевые слова: интерферометрия, асферическое выпуклое зеркало, контроль.

Большинство существующих методов аттестационного контроля формы выпуклых оптических зеркал большого диаметра подразумевают использование вспомогательных оптических элементов, размеры которых превышают размеры контролируемого зеркала. Таковы, например, все интерференционные методы: метод анаберрационных точек (метод Хиндла), компенсационный и голографический методы [1-3]. Из альтернативных методов для контроля выпуклых зеркал подходит только дефлектометрия [4],

однако она не обладает достаточной точностью. В этой связи на практике применяются методы переналожений [5,6], согласно которым зеркал контролируется тем или иным интерференционным методом по частям с последующей сшивкой участков в единую топографическую карту отклонений. Сшивка неминуемо приводит к увеличению погрешности контроля (определения общей погрешности формы). Одним из возможных решений это проблемы является применение схемы ортогональных лучей [7], согласно которой освещение контролируемого зеркала осуществляется коллимированным пучком лучей, перпендикулярных оси симметрии зеркала. Интерферометр оригинальной конструкции [8], построенный по этой схеме, описан в наших работах [9,10]. В настоящем докладе представлены результаты экспериментальной апробации интерферометра, подробно рассмотрены этапы его юстировки, а также влияние погрешностей его конструктивных параметров на точность контроля.

Список литературы

1. Оптический производственный контроль/ Под ред. Д. Малакары: Пер. с англ. Е.В. Мазуровой и др.; Под ред. А.Н. Соснова. – М.: Машиностроение, 1985.
2. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. – М.: Машиностроение, 1976.
3. Goncharov A.V., Druzhin V.V., Batshev V.I. Non-contact methods for optical testing of convex aspheric mirrors for future large telescopes // Proc. SPIE, 2009. V. 7389. P. 73891A
4. Knauer M. C., Kaminski J., Hausler G. Phase measuring Deflectometry: a new approach to measuring specular free-form surfaces // Proc. SPIE, 2004, V. 5457, P. 366–376.
5. Burge J. H. Fizeau interferometry for large convex surfaces// Proc. SPIE, 1995, V. 2536, P. 127–138.
6. Burge J.H., Su P. Zhao C. Optical metrology for very large convex aspheres // Proc. SPIE, 2008, V. 7018, P. 701818.
7. Способ измерения профиля оптических поверхностей: а.с. 1044969 СССР / Д.Т. Пуряев. № 3467407.25-28; Заявлено 09.07.82; Опубл. 30.09.83.
8. Метод контроля формы выпуклых асферических поверхностей и устройство для его осуществления: Пат. 2706388 Российская Федерация / Новиков Д.А., Иванникова Н.В. Батшев В.И., Мачихин А.С., Гавлина А.Е. № 2019103813; заявл. 12.02.2019; опубл. 18.11.2019
9. Gavlina A.E., Batshev V.I., Novikov D.A., Sergeeva M.V. Interferometer for large convex optical aspheric surfaces testing // Proc. SPIE, 2019, V. 11056, P.110563T.

ALIGNMENT METHOD OF ORTHOGONAL RAY INTERFEROMETER FOR TESTING OF LARGE CONVEX MIRRORS

Batshev V.I., Novikov D.A., Gavlina A.E., Balandin I.A.

[1]Bauman Moscow State Technical University
[2]Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS
[3]All-Russian research institute of metrological service
batshev@bmstu.ru

The optical system of the near-infrared (0.9-1.7 μm) acousto-optical spectral imager was designed. Optical aberrations of the system are minimized in ZEMAX due to the optimization of the acousto-optical cell geometric parameters. A prototype of the designed system is presented, providing high quality spectral images and the absence of distortion and chromatic shift. The spatial resolution is limited by the diffraction. The value of spatial resolution is 30 μm in the image plane within the entire field of view.

Keywords: spectral imaging, acousto-optic filtration, aberrations.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТУСОВ ПРОГРАММЫ ZEMAX ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НАКЛОННЫМИ ЗЕРКАЛАМИ

студент Федоринов А.С., ст. преподаватель Качурин Ю.Ю.

Московский государственный технический университет им. Н,Э. Баумана
aleksandr.fedorinov2017@yandex.ru
caich@mail.ru

Работа посвящена сравнительному анализу значений, получаемых при использовании статусов Marginal Ray Height, Center of Curvature, Pupil Position, Chief Ray Height при разных способах создания модели наклонного зеркала. Полученные результаты позволяют дать рекомендации по оптимальному использованию статусов при различных способах создания наклонного зеркала.

Ключевые слова: наклонное зеркало, solve on surface, ZEMAX

Зеркала являются одним из основных оптических элементов. Они используются как самостоятельные элементы, так и в составе зеркально-линзовых систем. Одной из задач, которые решают зеркала – поворот оптической оси системы. Эту задачу выполняют наклонные зеркала. Их моделирование в программе ZEMAX можно осуществить следующими способами [1,2]:

- с помощью поверхности типа Standard для зеркала и пары поверхностей Coordinate Break (далее способ 1);
- за счет установок контекстного меню Surface Properties вкладка Tilt/Dec(далее способ 2);
- с помощью поверхности Irregular и поверхностей Coordinate Break (далее способ 3);
- в комбинированном последовательно-непоследовательно режиме (далее способ 4).

Для ориентации последующих оптических элементов, таких, например, как приемники излучения, относительно наклонного зеркала, можно использовать фиксированные значения осевого расстояния, а можно воспользоваться статусами [1,3]. Одними из часто применяемых статусов являются:

- - Marginal Ray Height (определяющий положение плоскости Гаусса при значении параметров Pupil Zone =0, Height=0);
- - Center of Curvature (помещающий связываемую поверхность в центр кривизны одной из ранее введенных поверхностей);
- - Pupil Position (определяющий положение выходного зрачка);
- - Chief Ray Height (определяющий положение выходного зрачка при значении параметра Height=0).

Данная работа посвящена сравнительному анализу значений получаемым при использовании этих статусов при разных способах создания модели наклонного зеркала.
Нами исследованы две системы:

- - объектив с поворотным плоским зеркалом;
- - наклонное сферическое зеркало.

Для первого случая нами был взят двухлинзовый склеенный объектив, к которому добавили плоское поворотное зеркало, отклоняющее оптическую ось на 90º. Для сравнения брались аналогичные значения только объектива за вычетом осевого расстояния между объективом и зеркалом. При сравнении значений учитывался факт того, что согласно правилу знаков для отрезков после отражения знак должен измениться на противоположный.
Модель наклонного зеркала в комбинированном последовательно-непоследовательно режиме создавалась в непоследовательной области при помощи элемента Rectangle (прямоугольник), поверхности которого мы присвоили свойства отражающего элемента.
При статусе Center of Curvature плоскость изображения совмещалась с центром кривизны последней поверхности объектива.
Анализируя данные из таб.1 мы видим, что использование статусов Marginal Ray Height для установки плоскости изображения в плоскость Гаусса и Chief Ray Height - в плоскость выходного зрачка дают корректные результаты для все четырех способов создания модели поворотного зеркала. Назначение статуса Center of Curvature приводит к значению, равному по модулю, но отличающемуся по

знаку. В комбинированном последовательно-непоследовательном режиме невозможно определить положение выходного зрачка с помощью статуса Pupil Position, но можно воспользоваться статусом Chief Ray Height, который как видно из таб.1 даёт идентичные результаты.
Во втором случае мы исследуем наклонное сферическое зеркало, которое так же отклоняет оптическую ось на 90°. Для сравнения брались аналогичные значения статусов для сферического зеркала, так же стоит учитывать при сравнении, что результаты должны при отражении изменить свой знак на противоположенный.

Таблица 1. Результаты, выдаваемые программой «Zemax», для двухлинзового склеенного объектива с поворотным зеркалом.

Способ задания поворотного зеркала	Установленный статус для осевого расстояния от поворотного зеркала до плоскости изображения			
	Marginal Ray Height	Center of Curvature	Pupil Position	Chief Ray Height
1	Корректное значение	Отличается знаком значения	Корректное значение	Корректное значение
2				
3				
4	Корректное значение относительно выходного порта непоследовательной области		Некорректное значение	Корректное значение относительно выходного порта непоследовательной области

Для моделирования сферического зеркала мы использовали последовательно-непоследовательный режим, с помощью которого мы интегрировали в оптическую систему твердотельную модель данного зеркала, начерченную в программе «SolidWorks», так же как и при первом исследовании внутренней поверхности твердотельной модели надо присвоить значение отражающей поверхности. Стоит так же учесть, что осевое расстояние до твердотельной модели задается отдельно.

Таблица 2. Результаты, выдаваемые программой «Zemax», для сферического наклонного зеркала.

Способ задания поворотного зеркала	Установленный статус для осевого расстояния от поворотного зеркала до плоскости изображения				
	Marginal Ray Height		Center of Curvature	Pupil Position	Chief Ray Height
	Параксиальный луч	Реальный луч на малой высоте			
1	Значение половины радиуса кривизны	Корректное значение	Значение радиуса кривизны	Корректное значение	Не работает, оставляет предыдущее значение
2					
3					
4	Корректное значение относительно выходного порта	Некорректное значение	-	Некорректное значение	

Из таб.2 видно, что для первых трех моделей корректные значения для положения плоскости Гаусса получаются в случае задания не параксиального луча, а реального. В случае комбинированного последовательно-непоследовательного режима – при задании параксиального луча. Статус Chief Ray Height не дает корректного положения выходного зрачка, а оставляет предыдущее значение.

Выводы

Полученные результаты позволяют избежать в дальнейшем ошибок в применение статусов Marginal Ray Height, Center of Curvature, Pupil Position, Chief Ray Height в моделях оптических систем, использующих наклонные зеркала.

Список литературы

1. Руководство пользователя пакетом программ ZEMAX. Пер. с англ. А.Э. Наджип. Москва, 2010 986 с.
2. Федоринов А.С., Качурин Ю.Ю., Моделирование наклонного сферического зеркала в программе «Zemax», Всероссийская студенческая конференция «СТУДЕНЧЕСКАЯ НАУЧНАЯ ВЕСНА», посвященная 190-ЛЕТИЮ МГТУ им. Н.Э. Баумана» сборник тезисов и докладов, г. Москва, 01-30 апреля 2020г. Стр. 182
3. Заварзин В.И., Батшев В.И., Польщикова О.В. Компьютерные технологии и моделирование в оптотехнике: учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2017 – 37с.

ZEMAX SOLVE USAGE IN MODELING OF OPTICAL SYSTEM WITH INCLINED MIRRORS

student Fedorinov A.S., senior Lecturer Kachurin Yu.Yu.

Bauman MSTU
aleksandr.fedorinov2017@yandex.ru
caich@mail.ru

The work is devoted to the comparative analysis of Marginal Ray Height, Center of Curvature, Pupil Position, Chief Ray Height solve values when modeling of optical systems with inclined mirrors. The results make it possible to give recommendations on an optimal usage of solves for different ways of inclined mirror modelling.

Keywords: inclined mirror, solve on surface, ZEMAX

ЛАЗЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С АКУСТООПТИЧЕСКИМИ ДЕФЛЕКТОРАМИ ДЛЯ ЗАХВАТА И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МИКРООБЪЕКТОВ

студент Виноградов М.А., доцент, к. т.-н. Носов П.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана
vinmax96@gmail.com
pan@bmstu.ru

Рассмотрена задача расчета распределения поля световых пучков после оптической системы с акустооптическими дефлекторами и представлены результаты моделирования. Обсуждается применение лазерной оптической системы с акустооптическими дефлекторами для перемещения микрообъектов.

Ключевые слова: оптический пинцет, лазерная оптическая система, акустооптический дефлектор, дифракция

Введение

Акустооптические устройства, в частности, акустооптические дефлекторы, находят широкое применение в оптических приборах и технологиях [1-4]. Высокая скорость перестройки и отсутствие механики в акустооптических дефлекторах являются важными преимуществами по сравнению с подвижными зеркалами [4-10].

В современных приборах и технологиях лазерные оптические системы формируют световые пучки с различными распределениями поля: гауссово, лагерр-гауссово, гипергауссово, бесселево различных порядков и др. При разработке лазерных оптических систем с акустооптическими дефлекторами важно знать выходное распределение поля. Это является особенно важным в прецизионных лазерных технологиях.

Для расчета электромагнитного поля на выходе оптических систем с акустооптическими элементами существуют различные приближения [11-15]. Однако, они либо не учитывают анизотропную дифракцию в акустооптическом кристалле, либо чрезмерно сложные для анализа и требуют применения специальных численных методов и средств. Поэтому важна практичная методика расчёта оптических систем с акустооптическими элементами, адекватно описывающая распространение светового пучка с произвольным распределением интенсивности поля с учётом геометрии акустооптического кристалла.

В работе рассмотрена инженерная методика расчёта распространения светового пучка через лазерную оптическую систему с акустооптическими элементами, представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований по формированию произвольной траектории перемещения оптической ловушкой.

1. Схемы оптических пинцетов на различных принципах работы

Оптический пинцет – это инструмент для захвата, удержания и перемещения микрообъектов с помощью оптического излучения. Его работа основана на так называемой оптической ловушке, принцип действия которой впервые продемонстрировал Артур Эшкин [16,17]. Оптический пинцет сфокусированным лазерным излучением обеспечивает стабильное бесконтактное трехмерное удержание и перемещение микро- и нанообъектами.

Стандартная схема оптического пинцета включает в себя лазер и микрообъектив, на выходе которого формируется сильно сфокусированный лазерный гауссов пучок. Это накладывает ограничения на размеры манипулируемых частиц, их количество и возможность их перемещения. Также стоит отметить, что в области перетяжки сильно сфокусированного пучка плотность мощности излучения довольно высока, что может привести к повреждению объектов.

При использовании гауссова пучка задача манипулирования частицами решается следующими способами:

- установка образцов на подвижный стол (пьезо-столик, стол с сервоприводом);
- использование подвижных зеркал (гальваносканеры, зеркала на карданном подвесе, зеркала на пьезоэффекте);
- применение акустооптического дефлектора (АОД);

Ещё одним подходом для создания одновременно большого количества ловушек является метод голографического пинцета [18,19]. Чтобы «разбить» исходный лазерный пучок на несколько для формирования нескольких независимых оптических ловушек с задаваемыми параметрами, используют дифракционные оптические элементы (ДОЭ) или пространственный модулятор света (ПМС).

Наиболее часто в схемах пинцетов встречаются ПМС и подвижные зеркала. Недостатком зеркал является их цена, а также инерционность. Невозможно с помощью зеркала моментально изменить направление распространения пучка, также инерционность зеркал исключает сканирование, а значит, манипуляцию массивами частиц. С помощью ПМС в задачах манипулирования объектами создают массивы пучков различных типов (моды гауссова пучка, бесселевые пучки, вихревые пучки). Также с помощью ПМС можно отклонять пучок. Однако, обычно ПМС все равно используется в связке с подвижным зеркалом.

АОД, напротив, позволяет менять направление пучка моментально, меняя частоту звуковой волны. С помощью АОД осуществляют манипуляцию сразу несколькими частицами путем сканирования (time-sharing optical tweezers). Это возможно благодаря тому, что обычно рассматриваемые образцы находятся в вязкой среде, соответственно, они не успевают изменить своего положения за время «прохода» пучка по всем частицам. АОД позволяют создать в оптическом пинцете множество ловушек высокой стабильности.

2. Результаты моделирования

Для управления параметрами лазерного излучения широко используют рефракционные и дифракционные явления, возникающие при распространении излучения в среде, пространственная модуляция коэффициента преломления которой создается ультразвуковыми (акустическими) волнами.

Пусть в прозрачной среде распространяется бегущая акустическая волна размером L (рис. 1), которая из-за фотоупругости вызывает периодическое изменение показателя преломления по закону

$$n(x,t) = n_0 + \cos(2\pi ft - K_a x),$$

где n_0 – показатель преломления невозмущенной среды, f и K_a – частота и волновое число акустической волны ($K_a = 2\pi f/\upsilon_a$), υ_a – скорость звука в среде, Δn – амплитуда колебания показателя преломления материала кристалла при приложении к нему звуковой волны.

Кристалл TeO_2 является двулучепреломляющей средой, поэтому он обладает двумя показателями преломления n_o и n_e. Наш случай подразумевает преобразование пучка с необыкновенной поляризацией в пучок с обыкновенной. При этом показатель преломления для падающего луча n_i также зависит от угла падения луча, а показатель преломления для выходного луча n_d можно считать постоянным и равным n_o.

На основе скалярной теории дифракции [20] для углового спектра пучка на выходе акустооптического дефлектора имеем выражение:

$$E(\varphi_d) = \int_{-w_0}^{w_0}\int_0^L E_0(x,z)\exp\left\{jk_0 n_o\left[-x\sin\varphi_d + (L-z)\cos\varphi_d\right]\right\}dxdz.$$

Здесь w_0 – радиус пучка, k_0 – волновой вектор световой волны в вакууме.

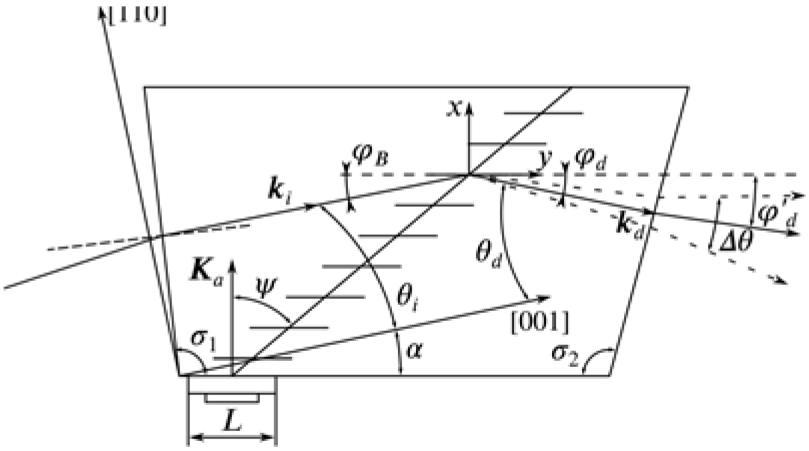


Рис. 1. *Схема акустооптического дефлектора на основе* TeO_2.

Проведём моделирование распределения интенсивности поля для следующих параметров:

λ, мкм	w_0, мм	M^2	L, мм	f, МГц	υ_a, м/с	n_o	Δn
0,671	0,6	1,0	2	80 ± 15	669	2,2609	$5\cdot10^{-5}$

На рис. 2 представлена индикатриса распределения интенсивности поля на выходе АОД для случая входного гауссова пучка с радиусом перетяжки $w_0 = 0{,}6$ мм.

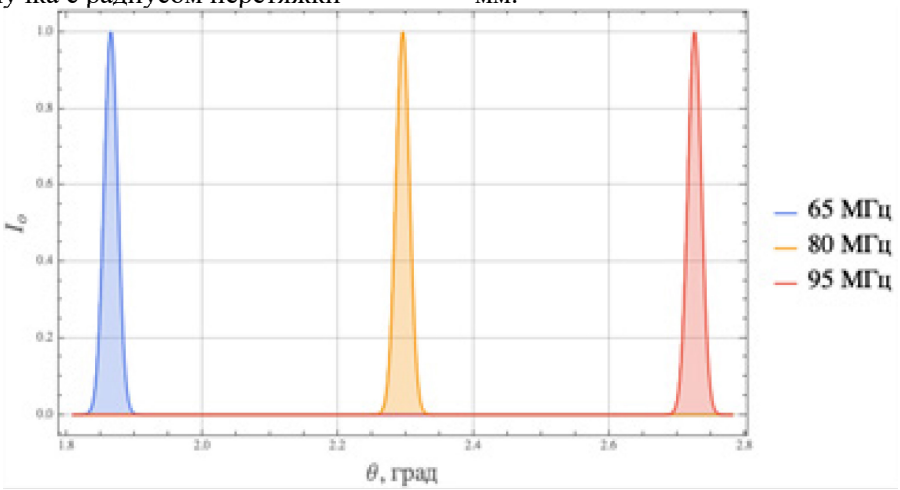


Рис. 2. *Индикатриса распределения интенсивности поля излучения на выходе АОД.*

На рис. 3 представлен увеличенный фрагмент центрального пика.

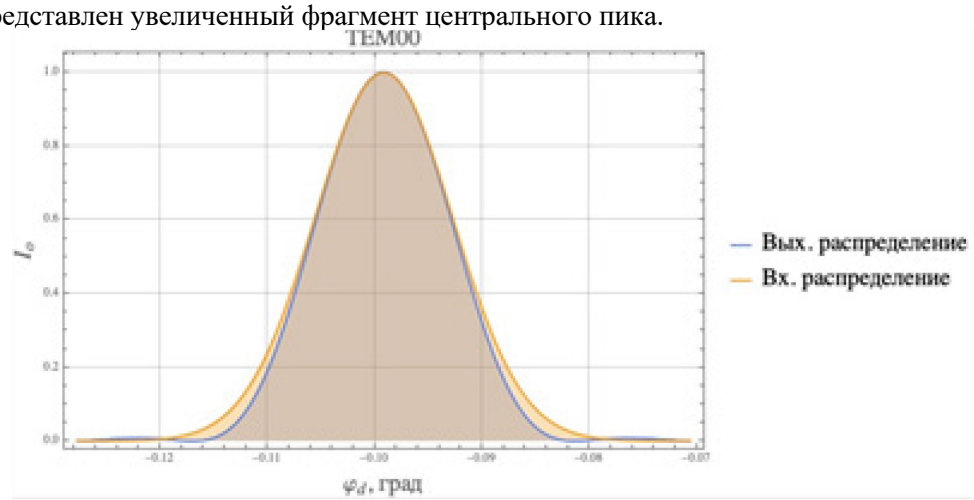


Рис. 3. *Индикатриса распределения интенсивности гауссова пучка на выходе АОД.*

Из рис. 3 видно, что полученное распределение практически совпадает с распределением интенсивности поля гауссова пучка. Угловой диаметр пучка $2u_1' = 0,041^\circ$. При изменении частоты диаметр пучка также не меняется. Сравним его с угловой расходимостью лазерного гауссова пучка:

$$2u_1' = 2\frac{M^2\lambda}{\pi w_0} = 0,041^\circ$$

Полученные значения совпадают. Следовательно, гауссов пучок не искажается при прохождении через АОД.

Распределение интенсивности при разных частотах двух АОД показано на рис. 4.

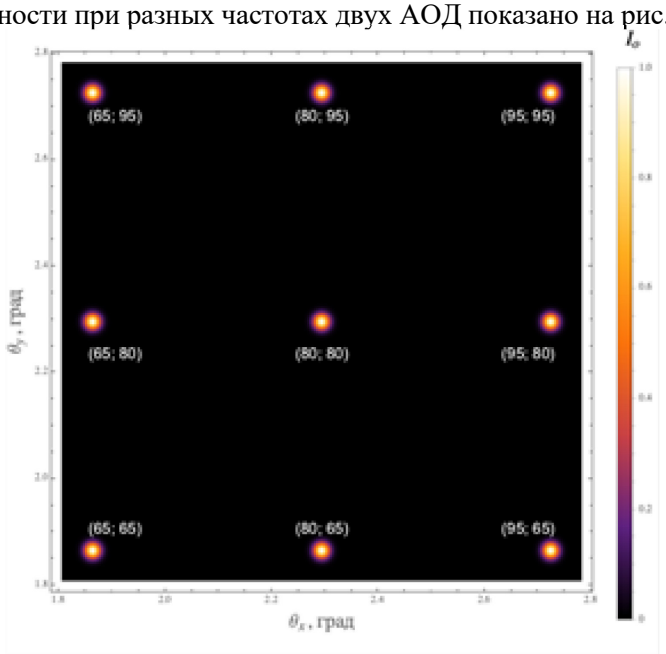
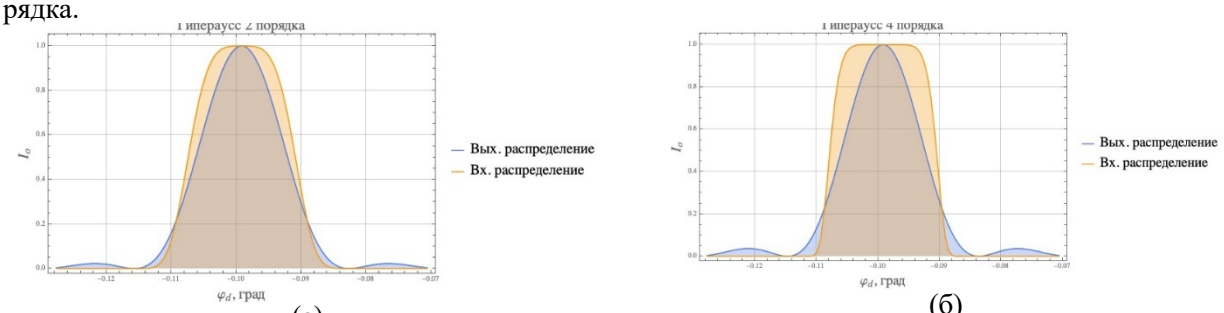


Рис. 4. *Двумерная индикатриса распределения интенсивности поля на выходе двух АОД, осуществляющих движение пучка по произвольной траектории (на рисунке частоты указаны в виде* (f_x, f_y)*).*

Рассмотрим лазерный пучок с гипергауссовым распределением интенсивности поля. На рис. 5 представлены распределения интенсивности поля лазерного пучка после акустооптического дефлектора, когда на входе пучки с гипергауссовым распределением интенсивности поля 2-го (рис. 5а) и 4-го (рис. 5б) порядка.



(а) (б)

Рис. 5. *Распределения интенсивности поля на выходе дефлектора.*

Из рис. 5 видно, что форма распределений интенсивности поля уже отличается от распределения интенсивности поля входного пучка.

Выводы

Проведенный анализ схем оптических пинцетов показывает преимущества использования акустооптических технологий в задачах захвата и перемещения микрообъектов. В результате моделирования распределения интенсивности поля лазерного пучка после акустооптического дефлектора получено, что для гауссова пучка выходного распределение поля практически не искажается, в отличие от гипергауссова распределения поля. Полученные теоретические результаты в дальнейшем будут сопоставляться с экспериментальными данными.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20155.

Список литературы

1. Shaoqun Zeng, Xiaohua Lv, and Chen Zhan, Wei R. Chen and Wenhui Xiong, Steven L. Jacques, Qingming Luo. Simultaneous compensation for spatial and temporal dispersion of acousto-optical deflectors for two-dimensional scanning with a single prism. Optics Letters, Vol. 31, No. 8, April 2006.
2. Dirk L. J. Vossen and Astrid van der Horst, Marileen Dogterom, Alfons van Blaaderen. Optical tweezers and confocal microscopy for simultaneous three-dimensional manipulation and imaging in concentrated colloidal dispersions. Review of Scientific Instruments, Vol. 75, No. 9, September 2004.
3. George Konstantinou, Paul A. Kirkby, Geoffrey J. Evans, K. M. Naga Srinivas Nadella, Victoria A. Griffiths, John E. Mitchell, and R. Angus Silver. Dynamic wavefront shaping with an acousto-optic lens for laser scanning microscopy. Opt. Express, 24(6), March 2016, pp. 6283–6299.
4. Gaddum D. Reddy and Peter Saggau. Fast three-dimensional laser scanning scheme using acousto-optic deflectors. Journal of Biomedical Optics 10 (6), 064038, November 2005
5. Philip H. Jones. Optical Tweezers / Philip H. Jones, Onforio M. Maragó, Giovanni Volpe. – United Kingdom: “Cambridge Univresity Press”. – 2015, 547 p.
6. Michael S. Woody, Marco Capitanio, E. Michael Ostap, and Yale E. Goldman. Electro-optic deflectors deliver advantages over acousto-optical deflectors in a high resolution, ultra-fast force-clamp optical trap. Opt. Express, 26(9), April 2018.
7. Justin E. Molloy. Optical Chopsticks: Digital Synthesis of Multiple optical traps. Methods in Cell Biology, Vol. 55, 1998.
8. Karel Svoboda, Steven M. Block. Biological applications of optical forces. Annu. Rev. Biophys. Biomol. Stmct., Vol. 23, 1994, pp. 247-85.
9. William H. Guilford, Joshua A. Tournas, Dragos Dascalu, and Douglas S. Watson. Creating multiple time-shared laser traps with simultaneous displacement detection using digital signal processing hardware. Analytical Biochemistry, Vol. 326, 2004, pp. 153–166.
10. Justin E. Molloy and Miles J. Padgett. Lights, action: optical tweezers. Contemporary Physics, 2002, Vol. 43, No. 4, pp. 241-258.
11. Clark Venzke, Adrian Korpel, and David Mehrl. Improved space-marching algorithm for strong acousto-optic interaction of arbitrary fields. Applied Optics / Vol. 31, No. 5, February 1992;
12. M.R. Chatterjee, T.-C. Poon, D.N. Sitter, Jr. Transfer function formalism for strong acousto-optic Bragg diffraction of light beams with arbitrary profiles. Acustica, Vol. 71, 1990.
13. Monish Ranjan Chatterjee, Fares S. Almehmadi. Numerical Analysis of First-order Acousto-optic Bragg Diffraction of Profiled Optical Beams using Open-loop Transfer Functions. Optical Engineering, Vol. 53(3), No. 036108, March 2014.
14. Korpel A. Acoustooptics / A. Korpel. – 2nd ed. – New York, 1997, 330 p.;
15. Магдич Л.Н. Акустооптические устройства и их применение / Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. – Москва: «Сов. радио», 1978, 112 с.;
16. Ashkin A., Dziedzic J. M. Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria // Science. 1987. Vol. 235(4795). P. 1517–1520.
17. Ashkin A., Dziedzic J. M., Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared-laser beams // Nature. 1987. Vol. 330(6150). P. 769–771.
18. Ivo T. Leite, et al. Three-dimensional holographic optical manipulation through a high-numerical-aperture soft-glass multimode fibre. Nat. Photon. 12, 33–39 (2018).
19. Grier, D. G. A revolution in optical manipulation. Nature 424, 810–816 (2003).
20. Дубнищев Ю.Н. Теория и преобразование оптических сигналов в оптических системах: Учебное пособие. 4-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2011. 368 с.

LASER OPTICAL SYSTEM WITH ACOUSTO-OPTIC DEFLECTORS FOR CAPTURE AND MANIPULATION MICRO-OBJECTS

student Vinogradov M.A., assistant professor, PhD Nosov P.A.

Bauman Moscow State Technical University
vinmax96@gmail.com
pan@bmstu.ru

The problem of calculating the light beams field distribution after an optical system with acousto-optic deflectors is considered, and the simulation results are presented. The applying of a laser optical system with acousto-optical deflectors for manipulation micro-objects is discussed.

Key words: optical tweezers, laser optical system, acousto-optical deflector, diffraction

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

асп. Карандин А.В., д. ф.-м. н., проф. Боритко С.В.

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

На примере разработанного в НТЦ Уникального приборостроения РАН спектрометра на основе акустооптической (АО) ячейки со скачкообразной фазовой манипуляцией показана возможность создания нового класса приборов – дифференциальных АО спектрометров с произвольной адресацией, работающих в реальном масштабе времени.

Одной из главных задач спектрометрии является точное определение положения спектральных линий всех компонентов. Довольно многие факторы вносят погрешность в регистрацию, одним из самых частых является ситуация, когда в спектре на фоне широкого пика высокой интенсивности (ПВИ) расположен более узкий пик малой интенсивности (ПМИ). В этом случае, как показано ни рис. 1, измерение спектрального положения максимума ПМИ происходит с существенной ошибкой.

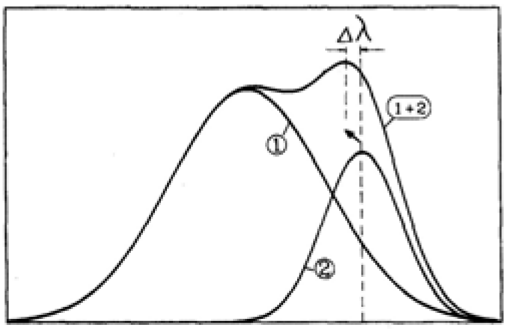
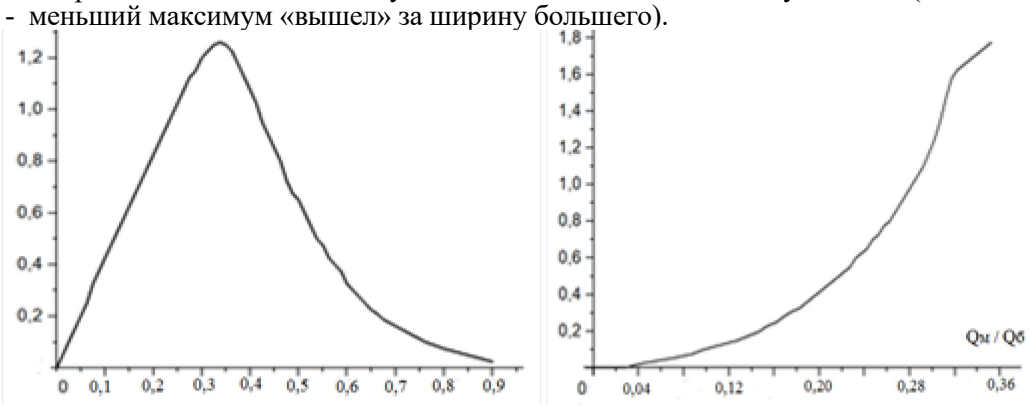


Рис. 1. *Перекрывающиеся ПМИ и ПВИ.*

Оценим величину возможной ошибки Δλ при измерении положения ПМИ в разных случаях. При совпадении их максимумов и при расположении максимума ПМИ на краю большого пика Δλ равна нулю. Однако, между этими ситуациями ошибка в измерении положении максимума существует. На рис. 2 (а) представлен график зависимости Δλ (в относительных единицах) измерения положения ПМИ в зависимости от отстройки положения максимума ПМИ относительно максимума ПВИ (0 – максимумы совпадают, 1 - меньший максимум «вышел» за ширину большего).



(а) (б)

Рис. 2. *Зависимость Δλ измерения положения ПМИ в зависимости от отстройки положения максимума ПМИ относительно максимума ПВИ (а) и Δλ измерения положения ПМИ в зависимости от его ширины (б).*

Важным является и зависимость Δλ от ширины ПМИ. Если меньший пик представляет собой дельта функцию, то ошибки в измерении его положения нет. Если ширина меньшего пика совпадает с шириной большего, то он просто не выделяется как второй максимум и говорить об ошибке его измерения бессмысленно. Изменяя ширину ПМИ, получаем график зависимости Δλ от отношения полуширины ПМИ к полуширине ПВИ в точке положения ПМИ, соответствующей максимальной ошибке (рис. 2 (б)).

Для оценки величины максимальной ошибки возьмем реальные данные. В видимом диапазоне, в районе зеленого света (532 нм), возьмем ПВИ с полушириной порядка 20 нм. В этом случае ошибка достигает 2-х нм. Много это или мало? Аппаратная функция двойного акустооптического монохроматора составляет 2 ангстрема, т.е. 0,2 нм. Для достоверного различения двух близко расположенных пиков необходимо, чтобы они последовательно попадали в соседние главные максимумы функции пропускания монохроматора при сканировании по спектру, когда они перекрываются на уровне 2√ высоты. Это соответствует разрешению 0,2 нм, что в 10 раз меньше возможной Δλ. Следовательно, появляется возможность повышения точности определения действительного положения спектральных линий в перекрывающихся спектрах. Эта задача весьма актуальна для спектральных исследований.

Эта задача решена дифференцированием спектральной зависимости и положение меньшего пика определяется с достаточной точностью. Этот метод используется в молекулярной спектроскопии и аналитической химии при исследовании мутных жидкостей и сложных растворов [1 - 3]. Процедура заключается в измерении частотной зависимости спектральной плотности образца, затем удаляется шумовая составляющая (сглаживание) и последующее дифференцирование результата.

В настоящее время возникают проблемы, например, в области химии, биологии и мониторинга окружающей среды, где требуются данные об изменении объектов в режиме реального времени, чтобы иметь возможность влиять на процесс. В работах [4, 5] теоретически была показана возможность регистрации спектра оптического излучения и его производных в процессе проведения измерений. В основе работ лежит акустооптическая (АО) дифракция на фазовой решетке, созданной акустической волной с резким периодическим переключением фазы.

В НТЦ УП РАН, на базе коллинеарной АО ячейки, был создан макет спектрометра, позволяющего регистрировать производные оптических спектров. В качестве тестового эксперимента была произведена регистрация излучения неоновой лампы, имеющей линейчатый спектр.

Следующим шагом было необходимо сопоставить производную, зафиксированную дифференциальным АО спектрометром, с математической, рассчитанной из частотной зависимости спектральной плотности. Были выбраны два пика излучения неоновой лампы, зарегистрированы их спектры и производные дифференциальным АО спектрометром. Для математического метода спектр был сглажен и продифференцирован. Оба результата дифференцирования приведены на рис.3. Различия между данными двух метода заметны: заужена производная полученная спектрометром и появление дополнительных экстремумов, связаны с аппаратной функцией АО монохроматора. Однако, на вершинах спектральных пиков, т.е. в районах пересечения производных нулевой линии результаты совпадают, что позволяет использовать АО дифференцирование для выявления тонкой структуры оптических спектров.

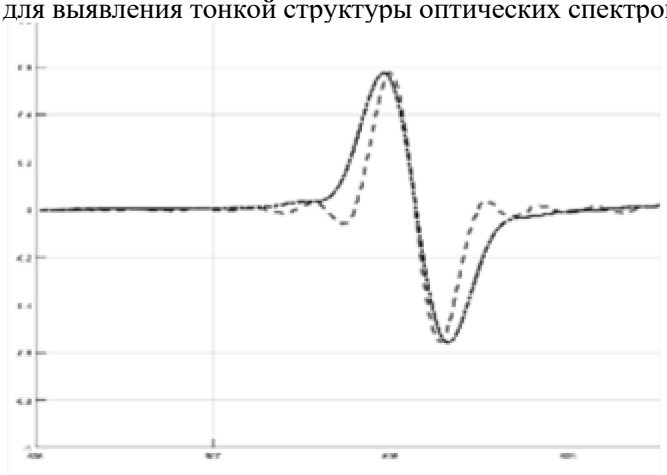


Рис. 3. *Результаты дифференцирования части зарегистрированного спектра неоновой лампы двумя методами.*

Из-за развития цифровой высокочастотной техники расширяются возможности синтеза электрических сигналов сложной формы и, следовательно, возможности возбуждения акустических волн "неординарной" структуры, что открывает перспективы создания новых акустооптических устройств.

Список литературы

1. Сааков В., Драпкин В., Кривченко А., Сердюк А., Розенгарт Е., Богачев Ю., Князев М. Производная спектрофотометрия и спектроскопия ЭПР при решении эколого-биологических проблем. Москва, Изд.: Технолит, 2010.
2. Берштейн И.Я., Каминский Ю.Л. Спектрометрический анализ в органической химии. Ленинград, 1986, 200 с.
3. Цокова Т.Н., Котлова Т.И., Осипова А.В. Метод производной УФ-спектрометрии определения концентрации лекарственного препарата в смесях. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015, № 11-5, с. 694-698.
4. Пустовойт В.И., Пожар В.Э. Управление характеристиками коллинеарного акустооптического фильтра путем модуляции ультразвука. Радиотехника и электроника, 1998, т.43, в.1, с.121-127.
5. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Дифракция света на акустической кусочно-однородной волне со скачкообразным изменением фазы. Успехи современной радиоэлектроники, 2006, в.9, с.47-61.

USING AO DIFFERENTIATION TO IDENTIFY SPECTRAL FEATURES OF OPTICAL SPECTRA

Karandin A.V., Boritko S.V.

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS

Using as example the developed in STC UI RAS acousto-optical spectrometer, based on an acousto-optic (AO) cell with a jump-like phase switching, we demonstrate the possibility of a new class of instruments creation — differential AO spectrometers with arbitrary spectrum addressing, working in real-time.

КЛАССИФИКАЦИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО АГРЕГИРОВАНИЯ

к.т.н. С.А. Сакулин, д.т.н. А.Н. Алфимцев

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
sakulin@bmstu.ru

Рассмотрен подход к классификации на основе нечеткого агрегирования и формализации знаний эксперта. Этот подход основан на применении операторов агрегирования. Нечеткий интеграл в качестве такого оператора позволяет формализовать знания эксперта о возможных зависимостях между параметрами процесса. Результатом такого анализа выступает значение принадлежности состояния заранее определенному классу.

Ключевые слова: классификация, оператор агрегирования, нечеткий интеграл

Под классификацией мы понимаем отнесение процесса, зависящего от времени, либо серии изображений, зависящих от временной или другой координаты, к каким-либо заранее заданным классам. Такая классификация осуществляется на основе формализованных экспертных знаний.

Для нашего подхода [1] мы не используем аналитические методы и методы, требующие большого объема статистических данных и останавливаемся на нечеткой логике. Такой выбор обусловлен несколькими причинами.

Во-первых, часто статистическая информация о процессах не хранится надлежащим образом, но при этом специалисты в соответствующей предметной области имеют богатый опыт по оценке состояния конкретного процесса.

Во-вторых, нечеткая логика позволяет в явном виде выразить весь ход рассуждений эксперта и при необходимости скорректировать его. Этим объясняется широкий спектр применения нечетких методов в течении продолжительного времени.

Тем не менее, прямое применение традиционных нечетких подходов к классификации состояния процесса сталкивается с трудностями. Эти трудности выражаются в аксиоматическом характере выбора типа слияния (fusion) нечетких данных в традиционных нечетких подходах, например с помощью средневзвешенных операторов агрегирования. Такое слияние не позволяет формализовать знания эксперта о возможных зависимостях данных, подлежащих слиянию, что может привести к неадекватности модели.

Поэтому в настоящее время представляется актуальной разработка оригинальных подходов, основанных на нечетких множествах, для многокритериального анализа решений в различных прикладных областях. Предполагается, что эти подходы не будут простым развитием существующих методов, а будут опираться на недавние достижения теории. Теория нечетких множеств и ее математическая среда обеспечивают фундаментальную основу для формализации, анализа и решения задач классификации.

В частности, в предложенном подходе в качестве оператора агрегирования применен интеграл Шоке, который в последнее время стал широко использоваться для решения различных практических задач [2-4].

Список литературы

1. Alfimtsev A. N., Sakulin S. A. Data fusion based on the fuzzy integral: Model, methods and applications //Data Fusion: Methods, Applications and Research. – 2017. – P. 1-64.
2. Сакулин С. А., Соколов Д. А., Выхованец В. С. Формализованная экспертная оценка качества образовательных

мультимедиа-ресурсов //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – №9 (128).
3. Alfimtsev A., Sakulin S., Levanov A. Formalization of expert knowledge about the usability of web pages based on user criteria aggregation //International Journal of Software Innovation (IJSI). – 2016. – Т. 4. – №. 3. – С. 38-50.
4. Сакулин С. А., Анисимова О.В. Формирование интегральных оценок успеваемости учащихся с помощью операторов агрегирования // Электронный журнал Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана №03, 2015 С. 256-268.

CLASSIFICATION BASED ON FUZZY AGGREGATION

S.A. Sakulin, A.N. Alfimtsev

Bauman MSTU
sakulin@bmstu.ru

An approach to classification based on fuzzy aggregation and formalization of expert knowledge is considered. The procedures for formalizing expert knowledge and classification are proposed. These procedures are based on the use of aggregation operators. A fuzzy integral as such an operator allows one to formalize the expert's knowledge about possible dependencies between the process parameters. The result of this analysis is the value of the state belonging to a predetermined class.

Keywords: Classification, aggregation operator, fuzzy integral

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОРРЕКЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АРТЕФАКТОВ ПРИ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

асп. Ларионов И.А., доц., к.т.н., Бессонов В.Б.,
асп. Староверов Н.Е., инж. Клонов В.В.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
ivan.al.larionov@gmail.com

На современном этапе развития техники и технологий рентгеновская компьютерная томография является одной из широко распространенных методик контроля внутреннего строения различного рода объектов. При проведении томографического исследования в силу ряда причин возможно появление посторонней информации об объекте в виде артефактов. В работе предлагается метод коррекции одного из типов возникающих при томографии артефактов – металлических артефактов. Разработанный метод позволяет уменьшить большинство артефактов и сохранить большое количество оригинальных деталей. Результаты моделирования эксперимента показали, что метод может значительно уменьшить влияние металлических артефактов.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, металлические артефакты, синограмма, сегментация

Введение

Рентгеновская компьютерная томография в настоящее время находит широкое применение как в медицинских, так и в промышленных целях. Постоянное развитие и улучшение качества томографических методов, а также расширяющийся список исследуемых объектов обуславливают рост числа исследовательских работ в данном направлении [1]. В большей степени данные работы посвящены различным методикам повышения качества и информативности проводимых томографических исследований, что

достигается в том числе посредством работы с данными на этапе процесса реконструкции исследуемого объекта. Работа с данными при этом заключается в основном в повышении их качества путем подавления различного рода артефактов. К основным артефактам, возникающим на реконструированных срезах, относятся: кольцевые артефакты; артефакты из-за наличия шума в изображении; металлические артефакты; увеличение жесткости излучения; артефакты «Вне поля исследования»; артефакты движения объекта исследования [2].

Металлические артефакты появляются на снимках компьютерной томографии, на которых присутствуют объекты с высоким коэффициентом поглощения рентгеновского излучения. Данный тип артефактов, которые выглядят как полосы или тени, часто ухудшают читаемость изображений компьютерной томографии. Для борьбы с металлическими артефактами может быть разработан специализированный метод их коррекции.

1. Метод коррекции металлических артефактов

В качестве тестового изображения для разработки метода на начальном этапе использовалось изображение фантома Шеппа-Логана, приведенный на рисунке 1 (аналог изображения головы человека, содержащей два белых участков, имитирующих металлические включения).

Рис. 1. *Фантом Шеппа-Логана.*

Согласно предлагаемому методу коррекции металлических артефактов можно выделить следующие его этапы:

1.1. Получение синограммы исходного изображения на основе преобразования Радона

Существует всего 2 подхода к моделированию процесса томографии: моделирование параллельного пучка излучения, в котором толщина каждого пикселя считается за толщину рентгеновского пучка, и моделирование веерного пучка излучения, в котором каждое значение пикселя может быть рассчитано как аппроксимация окружающих пикселей.

Для моделирования параллельного пучка необходимо суммировать каждый пиксель вдоль некоторой прямой, представляющей путь рентгеновского луча. Все прямые, вдоль которых происходит интегрирование являются параллельными друг для друга. При таком способе моделирования, все расчеты представляют собой цикл, включающий в себя операции суммирования и вращения. Количество столбцов либо строк в итоговой синограмме зависит от того, на какой угол поворачивается изображение. Единичная операция поворота дает один столбец в изображении синограммы, а итоговая синограмма образуется набором подобных столбцов.

Для моделирования веерного пучка, траектории лучей не совпадают со строками массива тестового изображения. Как и для параллельного метода моделирования, необходимо суммировать значения пикселей вдоль некоторой прямой, но в данном случае прямые не являются параллельными и образуют собой веер. Линии, вдоль которых происходит интегрирование представляют собой то, как распространяются рентгеновские лучи в реальном мире. При таком способе моделирования, необходимо аппроксимировать значения из двух ближайших пикселей. В данном случае расчеты представляют из себя цикл, состоящий из операций: расчет траекторий распространения веерного пучка, суммирование пикселей вдоль каждой траектории и поворот изображения.

В данном исследовании было проделано моделирование процесса рентгеновского томографического сканирования при параллельной форме пучка. Полученная синограмма фантома Шеппа-Логана изображена на рисунке 2.

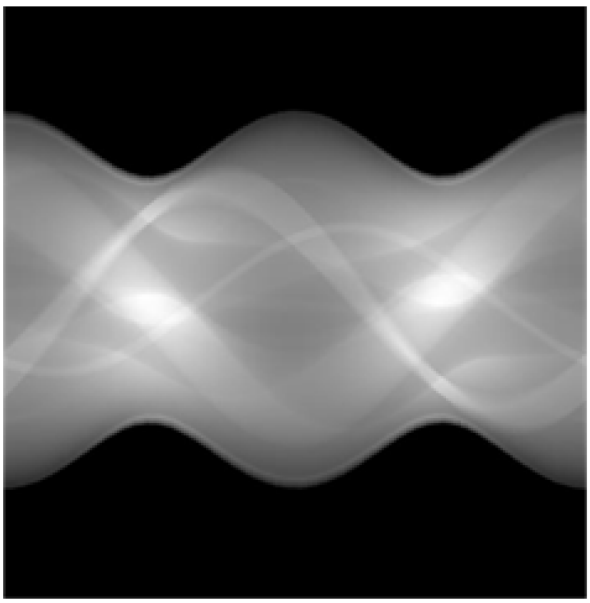


Рис. 2. *Синограмма фантома Шеппа-Логана*

На полученной синограмме отчетливо видны светлые полосы, возникшие из-за имитации металлических включений в фантоме Шеппа-Логана.

1.2. Сегментирование областей с металлическими включениями

Сегментация изображения в данном случае выполняется на основе алгоритма бинаризации изображения по указанному порогу. Для выполнения алгоритма с тестовым изображением, данной операции достаточно для обеспечения качественной сегментации, однако при работе с реальными изображениями, предпочтительнее применять метод бинаризации с двойным ограничением [3].

1.3. Вычитание синограммы металлических включений из общей синограммы изображения

Синограмма с сегментированным металлическими артефактами представляет собой изображение, состоящее из пикселей фона равным нулю и пикселей отвечающих за положение артефактов не равным 0. При вычитании одного изображения из другого движение происходит вдоль строк по каждому столбцу. При прохождении через каждый пиксель оригинального изображения с металлическими артефактами вычитаются значение пикселя изображения с сегментированными металлическими артефактами, имеющего такие же координаты, как и у оригинального изображения, получая новое изображение, которое похоже на оригинальную синограмму, но в ней пиксели, которые отвечают за положение металлических артефактов принимают нулевое значение. Таким образом полученная синограмма имеет пропуски в изображении, которые отвечают за положение металлических артефактов.

1.4. Заполнение вычтенных областей

В данном алгоритме были использованы методы перерисовки, основанные на алгебраической интерполяции и на методе наложения изображений. На основе сравнения полученных результатов можно заключить, что метод, основанный на алгебраической интерполяции, достовернее дорисовывает вычтенные области изображения.

1.5. Выполнение операции обратного проецирования

С помощью метода обратного проецирования из полученной на прошлом этапе синограммы осуществляется восстановление исходного изображения. Особенностью используемого алгоритма обратного проецирования является использование дополнительной фильтрации результата с помощью функции свертки. Благодаря фильтрации сверткой уменьшается эффект засветки, проявляющийся в методе обратного проецирования без свертки. При идеальной реализации данного метода, реконструируемое изображение будет наиболее точным, поскольку фильтрация сверткой уменьшает влияние ложного сигнала, засвечивающего соседние области. При таком подходе в большинстве случаев реконструированные изображения будут получаться темными, в связи с этим дополнительно требуется применение алгоритмов контрастирования изображения [4]. Результат работы алгоритма с применением контрастирования приведен на рисунке 3. При сравнении рис. 1 и рис. 3 видно, что изображения совпадают, однако на последнем имеется подавление металлических включений.

Программная реализация указанного метода избавления от металлических артефактов выполнена на основе языка C++ с применением библиотеки Qt.

Выводы

В результате проведенного исследования разработан и реализован алгоритм подавления металлических артефактов на томографических изображениях. Применение созданного метода позволяет повысить качество производимых исследований снижая влияние артефактов указанного типа на конечный результат. Возможно дальнейшее усовершенствование метода посредством улучшения метода обратного проецирования и добавления автоматического определения порогов сегментации на основе нейросети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19–37–90098 «Исследование и разработка методов повышения качества изображений при томографической реконструкции».

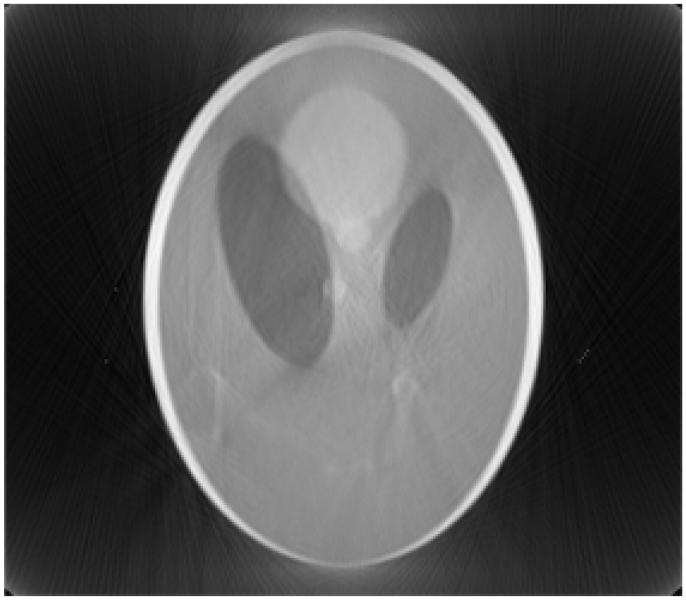


Рис. 3. *Результат работы предложенного метода коррекции металлических артефактов*

Список литературы

1. Бессонов В. Б. и др. Микрофокусные рентгеновские компьютерные томографы семейства МРКТ: опыт разработки и эксплуатации //Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии. – 2018. – С. 88-91.
2. Бессонов В. Б., Ларионов И. А., Ободовский А. В. Особенности разработки программно-аппаратных комплексов для микрофокусной рентгеновской компьютерной томографии //Физические основы приборостроения. – 2019. – Т. 8. – №. 4. – С. 23-33.
3. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms// IEEE Trans. Systems, man and cybernetics. 1979 Vol. 9, №.1 P 62-66.
4. Грязнов А. Ю. и др. Метод повышения резкости и контрастности деталей рентгеновских изображений //Физические основы приборостроения. – 2019. – Т. 8. – №. 4. – С. 34-37.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CORRECTING METAL ARTIFACTS IN TOMOGRAPHIC STUDIES

postgraduate Larionov I.A., PhD., Bessonov V.B., postgraduate Staroverov N.E., postgraduate. Klonov V.V.

Saint Petersburg Electrotechnical University IETI
ivan.al.larionov@gmail.com

At the present stage of technology development X-ray computed tomography is one of the most widely used methods for monitoring the internal structure of various types of objects. When performing a tomographic examination, for a number of reasons, extraneous information about the object may appear in the form of artifacts. The paper proposes a method for correcting one of the types of artifacts arising from tomography - metal artifacts. The developed method allows to reduce the majority of artifacts and save a large number of original parts. The results of the experiment simulation showed that the method can significantly reduce metal artifacts.

Keywords: X-ray computed tomography, metal artifacts, synogram, segmentation

ПЬЕЗОКЕРАМИКА СИСТЕМЫ ЦТС ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

к.т.н. Нагаенко А.В., инж. Малыхин А.Ю., маг. Ялынич С.А.

Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета
nagalexandr@gmail.com

Пьезокерамика на основе системы цирконата-титаната свинца (ЦТС) представляет собой основу большинства преобразователей работающих на пьезоэффекте и находят свое применение в различных устройствах электронной техники работающих в разделах электро- и гидроакустики, ультразвуковой техники и и д.р. Особый интерес в последние годы получило применение пьезокерамики в устройствах используемых при неразрушающем контроле. Однако разработанные в XX веке пьезоматериалы в значительной степени исчерпали возможности применения в современных устройствах, а разрабатывать новые составы достаточно сложно и экономически мало эффективно. В связи с вышесказанным актуальной задачей представляется поиск современных путей повышения параметров пьезокерамических материалов.

Ключевые слова: пьезокерамика, пьезоматериалы, керамическая технология, микроструктура, пьезоэлектрические преобразователи

Введение

В работе изучена возможность влияния микроструктуры пьезокерамических образцов на электрические и физические характеристики материала ЦТС-19 с помощью изменения режимов их термообработки с целью применения в пьезоэлектических преобразователях при неразрушающем контроле.

1. Постановка проблемы

Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) часто используют при ультразвуковом неразрушающем контроле, где они применяются как излучатели, так и приемники ультразвуковых импульсов, которые обрабатывает ультразвуковой дефектоскопом.

В зависимости от функций выполняемых ПЭП ультразвукового сигнала различают: совмещенные в которых пьезоэлемент, работает как в режиме приема так излучения и раздельно-совмещенные в которых одном преобразователи располагаются два и более пьезоэлемента, одни при этом работают исключительно в режиме излучения, а другие в режиме приема. Выбор типа преобразователя, определяется параметрами контролируемого объекта, таких как материал, толщина, форма, ориентация дефектов и т.д.

Известно, что параметры характеризующие работу ПЭП в режиме излучения и приема (акустическая мощность, добротность, механическое сопротивление, чувствительность и т.д.) определяют исключительно свойства активного материала и геометрическими размерами чувствительного пьезоэлемента [1, 2].

Таким образом управляя параметрами пьезокерамического материала, можно влиять на эффективность работы ПЭП, используемых при ультразвуковом неразрушающем контроле.

Пьезокерамические материалы на основе системы ЦТС получили широкое применение в различных устройствах современной техники в том числе благодаря возможности в широких пределах управлять их электрофизическими параметрами (ЭФП).

2. Основная часть

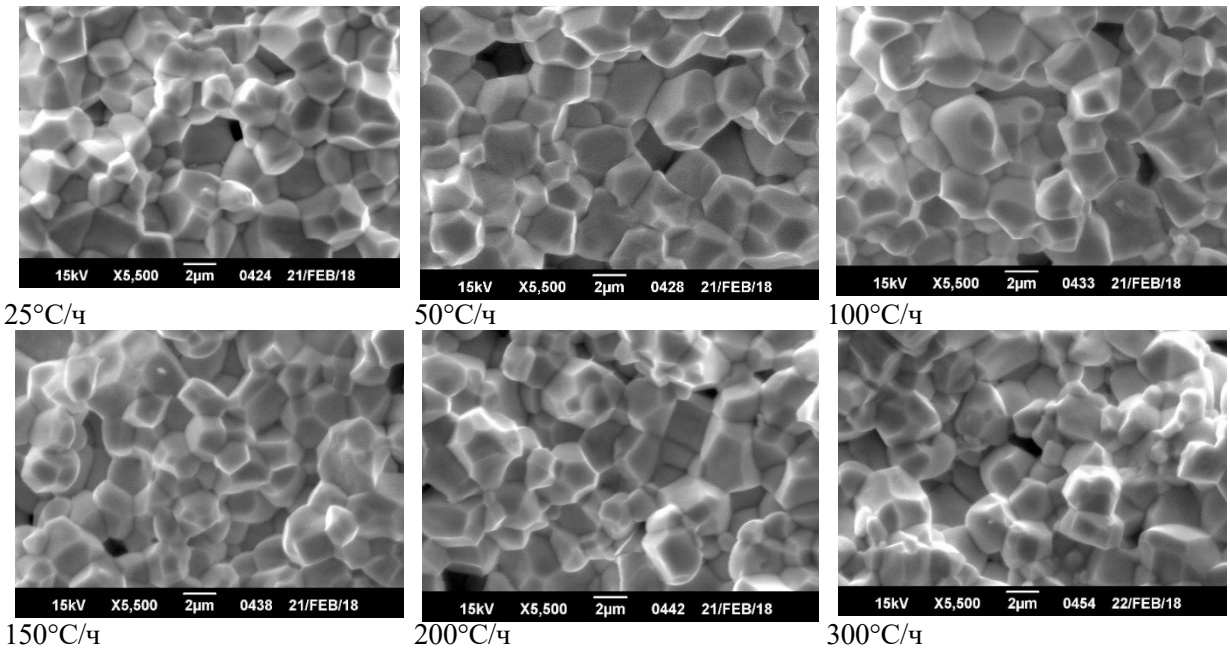
В настоящей работе рассматривается возможность управления электрофизическими параметрами материала ЦТС-19 с помощью технологических приемов (режимов спекания) на этапах изготовления пьезокерамических образцов.

Образцы пьезоэлементов для исследования были получены по обычной керамической технологии при температуре спекания 1230°С с различной скоростью нагрева, время выдержки при этом оставалось неизменным и составляло 2 ч.

Микроструктура (размер и форма зерна) спеченной керамики определяли по изображениям сколов на растровом электронном микроскопе рис. 1.

По данным микроскопии видно, что с увеличением скорости спекания, наблюдается небольшое снижение размеров зерен и концентрации дефектов микроструктуры. Скорость роста зёрен при этом снижается, а процесс первичной рекристаллизации нарастает в результате чего процесс вторичной рекристаллизации практически подавлен. Стоит обратить внимание, что образцы спеченные со скоростью 100°С/ч имеют максимальную «степень несовершенства» зерновой структуры. Т.е. можно говорить, что процесс спекания протекает по классической схеме: первичная рекристаллизация → столкновение зёрен, вызывающее их огранку [3-5].

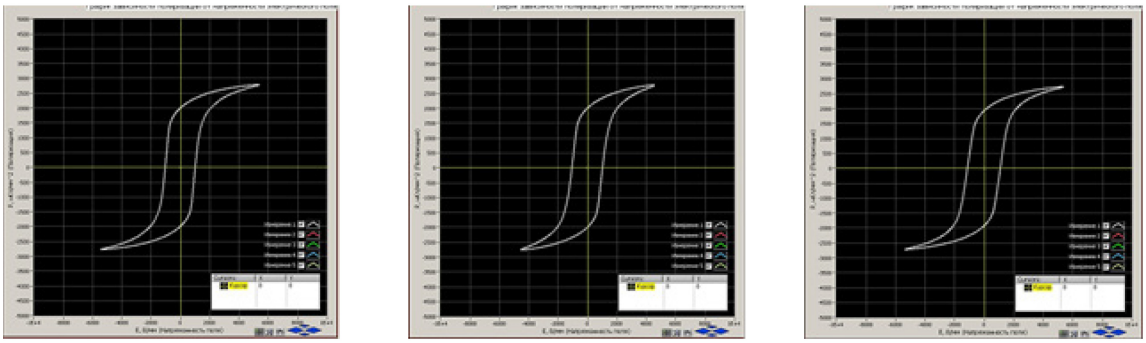
С целью установления влияния микроструктуры керамики на диэлектрическую прочность и величину остаточной поляризации образцов исследовались петли диэлектриеского гистерезиса рис. 2.



25°С/ч 50°С/ч 100°С/ч

150°С/ч 200°С/ч 300°С/ч

Рис. 1. *Микроструктура спеченных керамических образцов.*



25°С/ч 100°С/ч 300°С/ч

Рис. 2*. Петли диэлектрического гистерезиса пьезокерамических образцов*

Для исследуемых образцов увеличение скорости спекания не приводит к заметному изменению значений коэрцитивных полей (E_c~1кВ) и остаточной поляризации ($P_{ост}$~2000нКл/мм^2), что объясняется незначительным различием их микроструктуры, поскольку существует зависимость пьезоэлектрических свойств от размера зерна, которая связанна с увеличением концентрации и подвижности доменных стенок, облегчающих поляризацию керамики при увеличении зерна [6, 7].

На рис. 3 представлены зависимости основных параметров керамики ($\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$, d_{31}, K_{eff} и V_1^E) ЦТС-19 полученной различными методами.

Повышение скорости спекания, для образцов полученных по обычной керамической технологии, приводит к снижению среднего размера зерна керамики и сопровождается повышением $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$ и абсолютной величины пьезомодуля d_{31} при этом стоит отметить, что относительная диэлектрическая проницаемость проходит через свой максимум при скорости спекания равной 100°С/ч, K_{eff} и V_1^E имеют тенденцию к снижению, что по всей видимости связанно с неоднородностью микроструктуры. Невысокие значения $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$ и d_{31} при низких скоростях нагрева (25-50°С/ч) согласно [8], могут объясняться избыточными потерями оксида свинца.

Выводы

Проведённые исследования показали:

- ЭФП пьезокерамических материалов существенно зависят от технологии получения и скорости спекания образцов;
- оптимальной совокупностью ЭФП и МП обладает керамика, спеченная по обычной керамической технологии со скоростью нагрева 100°С/ч;
– пьезокерамические элементы на основе материала ЦТС-19 отличаются устойчивостью к электрическим воздействиям и характеризуются высокими значениями поляризации.

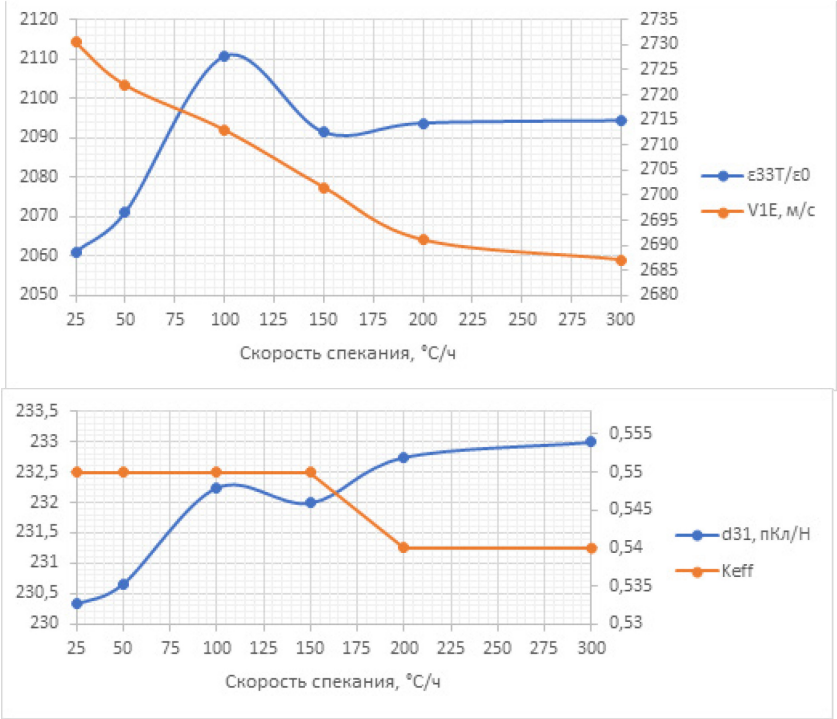


Рис. 3. *Основные электрофизические параметры пьезокерамических образцов*

Список литературы

1. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика/ Г.М. Свердлин // Судостроение, 1990. -320 с.
2. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики/ Б.С. Аронов // Энергоатомиздат, 1990. -272 с.
3. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. – М.: Энергия, 1976– 336 с.
4. Прилипко Ю.С. Функциональная керамика. Оптимизация технологии / Ю.С. Прилипко // Донецк: Норд-Пресс, 2007.-492 с.
5. Нагаенко А.В., Панич А.Е., Свирская С.Н., Малыхин А.Ю., Скрылёв А.В. Управление свойствами пьезокерамического материала системы ЦТС, используемого в гидроакустических излучателях. Инженерный вестник Дона, 2016, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3585.
6. Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А. и др. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна сегнетопьезоэлектрических материалов. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2001, 2002. Т. 1, 2. — 800 с
7. Резниченко Л. А., Алешин В. А., Шилкина Л. А. и др. Влияние модифицирования на свойства многоэлементной композиционной пьезокерамики // Конструкции из композиционных материалов. 2014. № 2. С. 61—67.
8. Hall C.E., Blum J.B. Effect of sintering heating rate on the electrical properties of Sr-PZT // Ferroelectrics. 1981. V. 37. P. 643-646.

PZT SYSTEM PIEZOCERAMICS FOR ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE TESTING

Ph.D. Nagaenko A.V., engineer Malykhin A.Yu., student Yalynich S.A.

Institute of High Technologies and Piezotechnics, Southern Federal University
nagalexandr@gmail.com

Piezoceramics based on the lead zirconate-titanate (PZT) system is the basis of the majority of transducers operating on the piezoelectric effect and are used in various electronic devices operating in the sections of electrical and hydroacoustics, ultrasonic technology, etc. In recent years, the use of piezoceramics in devices used in non-destructive testing has received particular interest. However, the piezomaterials developed in the twentieth century have largely exhausted the possibilities of application in modern devices, and it is rather difficult to develop new compositions and is not economically efficient. In connection with the above, an urgent task is to find modern ways to increase the parameters of piezoceramic materials.

Keywords: piezoceramics, piezo materials, ceramic technology, microstructure, piezoelectric transducers

СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СВЧ МОДУЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

асп. Кирьянов А.Ю

АО «НПП «Пульсар»
kirjanov_aj@pulsarnpp.ru

Особое место в производстве радиоэлектронной аппаратуры занимают испытания, как основная форма контроля электронных средств. В статье рассмотрен стенд для проведения технологических испытаний твердотельных СВЧ модулей с одновременным воздействием тепловой и электрической нагрузок.

Ключевые слова: технологические испытания, испытательный стенд

Введение

В серийном производстве особое значение приобретает информация, получаемая в результате контроля и испытаний электронных средств (ЭС) на различных этапах разработки и изготовления - от элементов до функционально и конструктивно более сложных ЭС.

Испытания как основная форма контроля ЭС представляют собой экспериментальное определение при различных воздействиях количественных и качественных характеристик изделий при их функционировании [1]. При этом как сами испытываемые изделия, так и воздействия могут быть смоделированы. Цели испытаний различны на различных этапах проектирования и изготовления ЭС. К основным целям испытания, общим для всех ЭС, можно отнести: выбор оптимальных конструктивно-технологических решений при создании новых изделий; доводку изделий до необходимого уровня качества; объективную оценку качества изделий при их постановке на производство, в процессе производства и при техническом обслуживании; гарантирование качества изделий при международном товарообмене.

Испытания служат эффективным средством повышения качества, так как позволяют выявить: недостатки конструкции и технологии изготовления ЭС, приводящие к срыву выполнения заданных функций в условиях эксплуатации; отклонения от выбранной конструкции или принятой технологии, допущенные в производстве; скрытые случайные дефекты материалов и элементов конструкции, не поддающиеся обнаружению существующими методами технического контроля; резервы повышения качества и надежности разрабатываемого конструктивно-технологического варианта изделия. По результатам испытаний изделий в производстве разработчик ЭС устанавливает причины снижения качества. Если эти причины установить не удается, совершенствуют методы и средства контроля изделий и технологического процесса (ТП) их изготовления.

Для повышения качества выпускаемых ЭС на конечных операциях ТП их изготовления проводят предварительные испытания, позволяющие выявить изделия со скрытыми дефектами. Режимы этих испытаний выбирают такими, чтобы они обеспечивали отказы изделий, содержащих скрытые дефекты, и в то же время не вырабатывали ресурса тех изделий, которые не содержат дефектов, вызывающих при эксплуатации отказы. Такие предварительные испытания часто называют технологическими тренировками (термотоковая тренировка, электротренировка, тренировка термоциклами и др.).

1. Требования, предъявляемые к испытательным стендам

Разрабатываемый стенд для испытаний должен обеспечивать их проведение в соответствии с требованиями ТУ и программы испытаний (ПИ). Испытательное оборудование должно давать:

- возможность установления заданных испытательных режимов,
- возможность их ручного и автоматического регулирования,
- задание и поддержание характеристик условий проведения испытаний,
- задание и поддержание значений параметров в допустимых пределах с соблюдением норм точности их воспроизведения.

Необходимо, чтобы оборудование позволяло вести автоматическую запись и программное управление режимами испытаний, а также вести учет времени наработки.

Применяемое оборудование должно быть выполнено в полном соответствии с требованиями единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и своевременно аттестовано. Аттестация испытательного стенда предусматривает определение нормативных характеристик испытательного оборудования, их соответствие нормативно-технической документации и установление пригодности этого оборудования к работе.

Повышение требований к электронным средствам по стойкости к воздействиям внешних факторов вызывает значительное увеличение объема испытаний, и приводит к увеличению трудоемкости испытаний и парку испытательной техники. Время, трудоемкость и, соответственно, стоимость проведения испытаний возможно снизить при помощи автоматизации испытаний.

Развитие автоматизации испытаний приводит к созданию комплексной высокоэффективной автоматизированной системы испытаний электронных средств. Под автоматизированной системой испытаний следует понимать программно-аппаратный комплекс на базе средств испытательной, измерительной и вычислительной техники, предназначенный для выполнения комплексных испытаний электронных средств.
Создание автоматизированной системы испытаний позволит [2]:
- сократить трудоемкость испытаний;
- повысить точность и достоверность испытаний;
- сократить персонал для проведения испытаний;
- повысить эффективность разработок ЭС и уменьшить затраты на разработку;
- сократить срок испытаний образцов новых ЭС;
- повысить оперативность в получении, обработке и использовании информации о надежности ЭС.

2. Характеристики стенда для проведения технологических испытаний твердотельных СВЧ модулей

Стенд предназначен для проведения испытаний на безотказность передающих модулей, работающих в импульсном режиме, и проведения технологических отбраковочных испытаний модулей при предельных электрических и тепловых нагрузках.
Конструктивно стенд выполняется по блочной схеме, и состоит из блоков, обозначенных на «рис.1».
В табл. 1 указаны основные технические характеристики испытательного стенда.

Таблица 1. Технические характеристики испытательного стенда

№п/п	Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
1.	Напряжение питания стенда	
1.1	Трехфазная четырехпроводная сеть переменного тока, В	380±10%
1.2	частота тока, Гц	50±1.5%
2.	Температура окружающего воздуха, °С	15÷35
3.	Относительная влажность воздуха, %	45÷80
4.	Атмосферное давление, кПа	84÷106
5.	Время непрерывной работы, ч	не менее 1000
6.	Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	не более 700х650х2000
7.	Приведенная основная погрешность средств контроля	
7.1	по напряжению питания, %	не более 2
7.2	по току потребления, %	не более 3
7.3	по поддержанию температуры воздуха в камере, %	не более 3
8	Количество одновременно испытываемых модулей	до 4
9	Напряжение питания модулей, В	540±10%
9.1	ток нагрузки питающего напряжения на канал, А	не более 2
10	Служебное напряжение питания модулей, В	27±3
10.1	ток потребления на канал, А	не более 1
11	Автогенератор СВЧ	
11.1	Рабочий диапазон частот, МГц	от 1200 до 1350
11.2	Входная импульсная мощность, Вт	1÷ 2.5
11.3	Максимальная длительность импульса, мкс	500
11.4	Минимальное значение скважности, отн.ед.	10
12	КСВН нагрузки, отн.ед.	не более 2.5
13	Протокол обмена информацией между блоком управления и модулем согласно стандарту RS-422 по ГОСТ 23675-79.	
14	Диапазон установки температуры воздуха в тепловой камере, °С	от 30 до 60

3. Особенности воздействия тепловых и электрических нагрузок в испытательном стенде.
Испытуемые модули расположены в приборном блоке стенда. Необходимые электрические и тепловые нагрузки для модулей создаются за счет подачи питающего напряжения на модули, входного СВЧ сигнала, и принудительного подогрева воздуха в камере, где расположен испытуемый модуль.
Стабилизация температуры корпуса каждого СВЧ модуля осуществляется в отдельном контуре принудительного конвективного теплообмена (далее контур), в который устанавливаются испытуемые приборы «рис.2». В контуре располагаются: сам модуль, который вследствие самостоятельного разогрева нагревает воздух в контуре, вентилятор, предназначенный для создания принудительного потока воздуха, управляемый нагреватель, служащий для поддержания заданной температуры воздуха, и термопары, для измерения температуры воздушного потока воздуха [3].

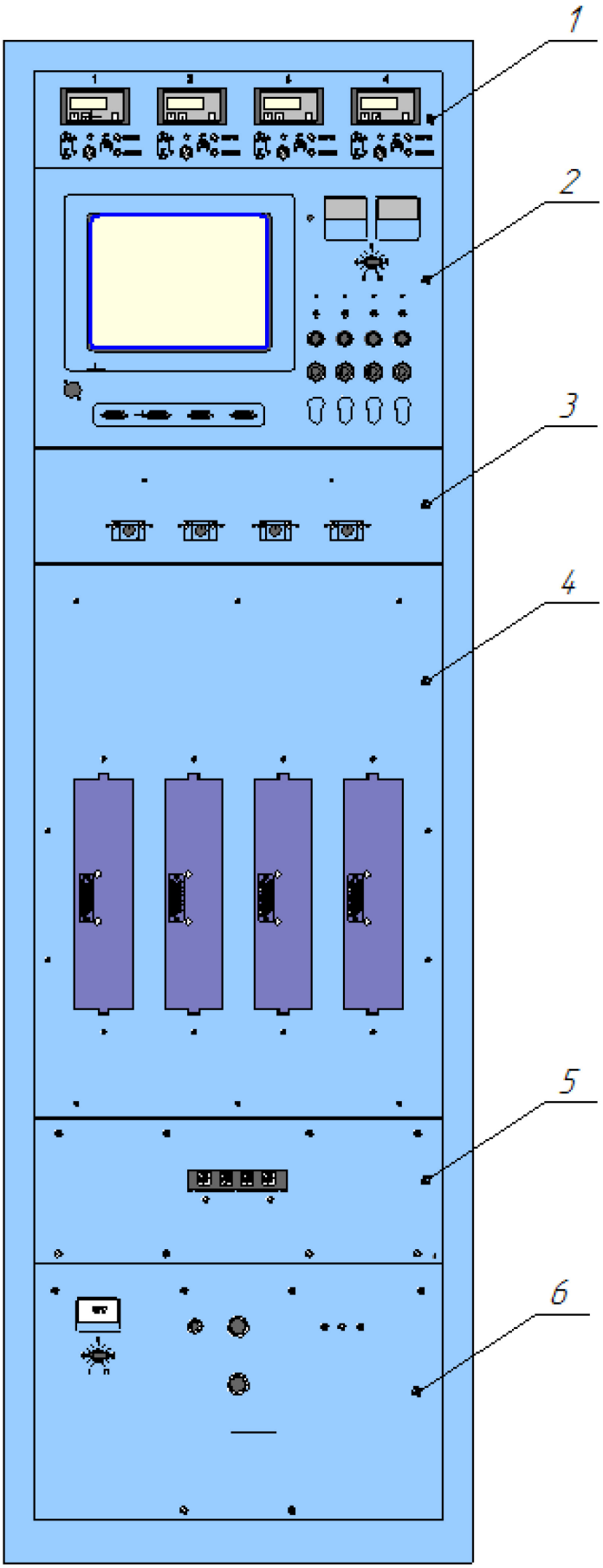


Рис. 1. *Внешний вид испытательного стенда, где: 1 - блок задания температуры (БЗТ), 2 - блок контроля и управления (БКУ), 3 - блок детекторов (БД), 4 - блок приборный (БПр), 5 - блок генератора (БГ), 6 - блок питания (БП).*

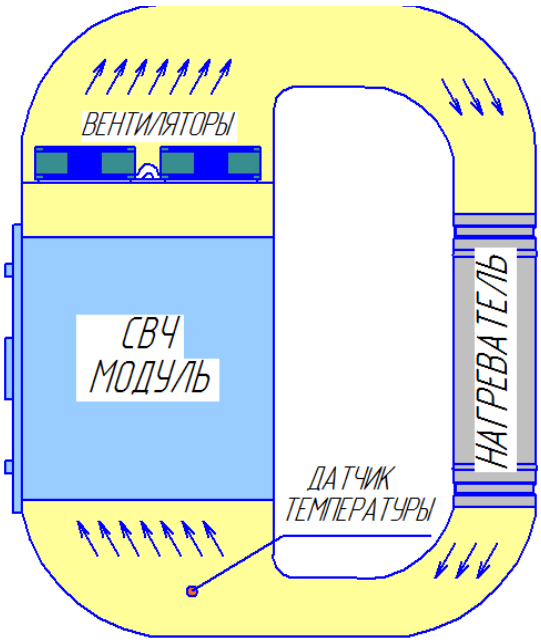


Рис.2. *Контур принудительного конвективного теплообмена.*

В процессе испытания, воздух, находящийся в контуре, при помощи вентилятора, начинает двигаться (циркулировать) в заданном направлении с установленной скоростью, которая определяется скоростью вращения вентилятора, геометрическими размерами и конструктивными особенностями контура. Поток воздуха, проходя через нагревательный элемент, нагревается. Датчик температуры, находящийся в контуре, измеряет значение температуры воздуха, которое передается в терморегулятор. В терморегуляторе, температура измеренного значения воздуха сравнивается с заданным значением воздуха, и в зависимости от результата сравнения, включает или отключает нагревательный элемент. Охлаждение воздуха в контуре происходит за счет естественного теплообмена между внешними стенками самого контура и окружающим воздухом. Температура окружающего воздуха является постоянной, и поддерживается на уровне +22°С, с помощью промышленного кондиционера.

Управление модулями осуществляется в динамическом режиме, который обеспечивает следующую последовательность работы модулей: 40 минут работы модуля с подачей питающего напряжения и входного СВЧ сигнала и 4 минуты режима ожидания без подачи напряжения питания и входного СВЧ сигнала. Подключение модулей к стенду производится посредством высокочастотных кабелей, снабженных разъемами.

Для контроля и управления испытуемыми модулями, измерения потребляемого тока, входной и выходной мощности СВЧ сигнала, отображения измеренных значений на ЖК экране в реальном режиме времени и их регистрации в цифровом виде, в стенде установлен промышленный компьютер со встроенным ЖК экраном и необходимым программным обеспечением.

Выводы

В данной работе были рассмотрены требования, технические характеристики и особенности воздействия тепловых и электрических нагрузок в стенде для проведения технологических испытаний твердотельных СВЧ модулей, применяемых в РЛС.

Указаны особенности стенда, влияющие на точность, достоверность и сокращение трудоемкости испытаний:

- осуществление теплового воздействия на модули в раздельных, независимых друг от друга камерах, что исключает взаимное влияние модулей друг на друга в период испытаний, позволяет задавать и поддерживать с высокой точностью тепловой режим испытаний, регистрировать более достоверные показания температуры для каждого модуля.
- создание автоматизированной системы испытаний за счет применения промышленного компьютера и специализированного программного обеспечения, в результате чего сократить трудоемкость испытаний, увеличилась точность измерения контролируемых параметров, уменьшилась вероятность появления ошибок в процессе измерений, имеется возможность сохранять данные для дальнейшего анализа работы модулей во время испытаний.

Список литературы

1. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС. – М.: Высшая школа, 1991. – 336 с.
2. Коробов А. И. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: Учебное пособие для ВУЗов – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.
3. Кирьянов А.Ю. Разработка методики и конструкции испытательного стенда для отбраковочных испытаний твердотельных СВЧ модулей. Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2020. №2 (257). С 69-75.

TEST FACILITY FOR TECHNOLOGICAL TESTING OF SOLID-STATE MICROWAVE MODULES, USED IN RADAR SYSTEMS

Kiryanov A.Yu.

S&PE Pulsar JSC
kirjanov_aj@pulsarnpp.ru

Testing takes a special place in the production of electronic equipment, as the main form of control of electronic devices. The article discusses equipment for technological testing of solid-state microwave modules with simultaneous exposure to thermal and electrical loads.

Keywords: technological testing, test facility

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРАХ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЖИЖЕННОГО ЭЛЕГАЗА

н.с., к.ф.-м.н. Никитин П.А.

НТЦ УП РАН, Москва
nikitin.pavel.a@gmail.com

Исследована работа акустооптического модулятора терагерцевого излучения на основе сжиженного элегаза при различных температурах и частотах ультразвуковой волны. Установлено, что оптимальными условиями для максимальной глубины модуляции терагерцевого излучения с длиной волны 119 мкм являются температура 0°С и давление 17 бар.

Ключевые слова: акустооптика, модулятор, терагерцевое излучение

Введение

При использовании материалов АО-ячейки, хорошо зарекомендовавших себя в инфракрасном диапазоне, глубина АО-модуляции ТГц-излучения составляет не более 0.01% на 1 Вт управляющей электрической мощности [1]. Это связано с большим значением коэффициента поглощения α ТГц-излучения в материале АО ячейки [2]. Недавние исследования показали, что в качестве среды АО-взаимодействия может быть использован элегаз (гексафторид серы, SF_6), поскольку это вещество прозрачно для ТГц-излучения и характеризуется высоким значением коэффициента АО-качества [3,4]. Благодаря этому глубина АО-модуляции возрастает на несколько порядков и может достигать 80% при значительной акустической мощности. Отметим, что экспериментальные результаты работ [3,4] противоречат использованной в них модели, согласно которой эффективность дифракции слабо зависит от температуры. Поэтому нами предлагается усовершенствованная модель, учитывающая дополнительный фактор, а именно: зависимость прозрачности среды АО взаимодействия от температуры. Расчёты выполнены для частот ультразвука 200, 300, 400 и 500 кГц.

1. Модель акустооптического взаимодействия в поглощающей жидкой среде

При малой акустической мощности P_a интенсивность I_1 дифрагированного излучения определяется следующим соотношением [4]:

$$I_1 = [I_0 \exp(-\alpha L)] \frac{\pi^2}{2\lambda^2} M_2 \frac{L}{d} [P_a \exp(-\alpha_s l)], \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность падающего излучения, d и L – ширина и длина излучателя ультразвука соответственно, l – расстояние, на котором ТГц-пучок проходит от излучателя ультразвука, $\alpha_s \propto F^2$ – коэффициент затухания мощности ультразвуковой волны, пропорциональный квадрату частоты, α – коэффициент поглощения излучения, M_2 – коэффициент АО-качества среды.
Показатель преломления n и коэффициент АО-качества M_2 для жидких сред и газов можно рассчитать, используя модель Лоренц-Лорентца [3]:

$$n = \sqrt{1 + \frac{2A\rho}{1 - 2A\rho/3}}, \quad M_2 = \left[\frac{(n^2-1)(n^2+2)}{6n}\right]^2 \frac{4}{\rho V^3}, \qquad (2)$$

где ρ – плотность среды, A – константа, V – скорость звука.
Для расчёта указанных параметров были использованы акустические и оптические свойства сжиженного элегаза, взятые из [3,5,6].

2. Результаты и обсуждение

Нами был использован безразмерный параметр $\xi = I_1/I_0$, пропорциональный интенсивности дифрагированного излучения, и его значение ξ_0 при $F_0 =$ 300 кГц, $t_0 =$ 20°C и $p_0 =$ 26 бар. Отметим, что значение ξ/ξ_0 не зависит от длины волны излучения, размеров излучателя ультразвука и мощности ультразвука, тем самым учитывая только влияние температуры и давления сжиженного элегаза, а также частоты ультразвука. Результаты расчёта приведены на рис. 1.

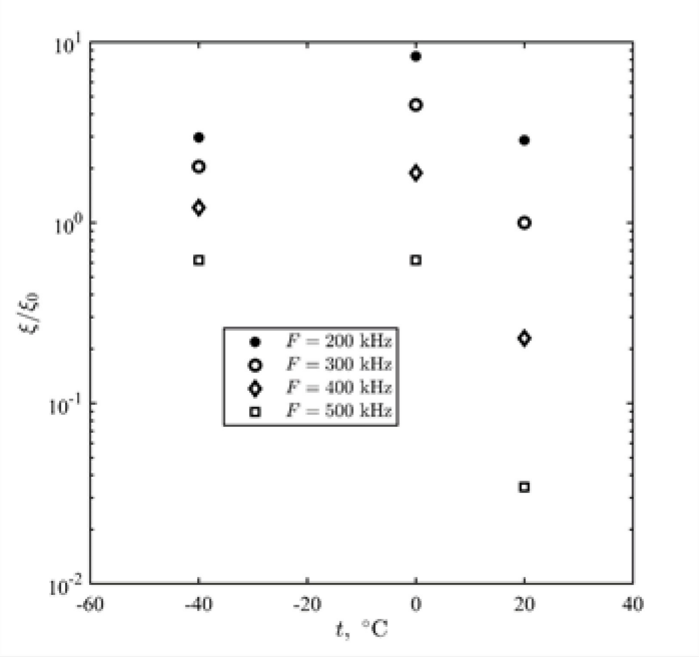


Рис. 1. *Передаточная функция коллинеарного АО-фильтра ТГц излучения с длиной волны 130 мкм.*

Зависимость интенсивности I_1 дифрагированного излучения от частоты F ультразвука для различных температур имеет следующий вид: 1) интенсивность I_1 больше при использовании более низкой частоты F ультразвука; 2) чем выше температура, тем более сильной является зависимость I_1 от F. Эту зависимость можно качественно объяснить следующим образом. С одной стороны, коэффициент затухания ультразвука α_s возрастает с частотой F. Поэтому интенсивность I_1 должна убывать с ростом частоты F, что подтверждается приведённым графиком. С другой стороны, коэффициент затухания ультразвука α_s возрастает с температурой. Поэтому различие в интенсивностях I_1 для различных частот F (например, 200 и 300 кГц) должно возрастать с температурой.

Выводы

Получена зависимость глубины АО-модуляции терагерцевого излучения от частоты ультразвука при использовании сжиженного элегаза в качестве среды АО-взаимодействия. Установлено, что при повышении частоты ультразвука с 200 до 500 кГц при температуре 20°C приводит к уменьшению глубины модуляции в 100 раз, в то время как при температуре -40°C – лишь в 2 раза. Результаты работы могут быть использованы для проектирования энергоэффективных АО-модуляторов ТГц-излучения.
Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания № 0057-2019-0006.

Список литературы

1. Vogel T., Dodel G. // Infrared Phys. 1985. V. 25. № 1/2. P. 315.
2. Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Kropotov G. I., Rogalin V. E. // Optics and Spectroscopy. 2019. V. 126. № 3. P. 191.

3. Durr W. // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1986. V. 7. № 10. P. 1537.
4. Nikitin P. A., Knyazev B.A., Voloshinov V.B., Scheglov M.A. // IEEE Trans. on Terahertz Sci. and Technol. 2020. V. 10. № 1. P. 44.
5. Keramati B., Wolgemuth C.H. // J. of Chem. and Engineering Data. 1976. V. 21. № 4. P. 423.
6. Vacek V., Zollweg J.A. // Fluid Phase Equilibria. 1993. V. 88. P.219.

TEMPERATURE EFFECTS IN ACOUSTO-OPTICAL MODULATORS OF TERAHERTZ RADIATION BASED ON LIQUEFIED SULFUR HEXAFLUORIDE

cand. of physico-mathematical sciences, Nikitin P.A.

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS
nikitin.pavel.a@gmail.com

The operation of an acousto-optic modulator of terahertz radiation based on liquefied sulfur hexafluoride at various temperatures and frequencies of an ultrasonic wave has been investigated. It was found that the optimal conditions for the maximum modulation depth of terahertz radiation with a wavelength of 119 μm are a temperature of 0°C and a pressure of 17 bar.

Key words: acousto-optics, modulator, terahertz radiation

ТРЁХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕКСАНА

н.с., к.ф.-м.н. Никитин П.А.

НТЦ УП РАН, Москва
nikitin.pavel.a@gmail.com

Теоретически исследована акустооптическая дифракция терагерцевого излучения на ультразвуке в гексане. Рассчитана передаточная функция фильтра излучения с длиной волны 130 мкм, в котором излучатель ультразвука имел квадратную форму с длиной стороны 5 мм. Установлено, что при дифракции терагерцевого излучения на реальном звуковом пучке по сравнению с однородным звуковым пучке эффективность дифракции в 2 раза меньше, а полоса акустооптического взаимодействия такая же в пределах погрешности.

Ключевые слова: акустооптика, фильтр, терагерцевое излучение

Введение

Известно, что при акустооптической (АО) дифракции на реальном ультразвуковом пучке могут проявляться ряд эффектов, например, уширение полосы АО взаимодействия [6]. Поэтому для корректного описания работы коллинеарного АО фильтра терагерцевого (ТГц) необходимо использовать 3D-модель ультразвукового пучка, а также 1D-уравнения связанных мод. В работе приведены результаты моделирования для гауссовского пучка ТГц излучения Новосибирского лазера на свободных электронах.

1. Моделирование звукового поля и АО взаимодействия

Одним из наиболее простых и эффективных методов расчёта звукового поля является его разложение по суперпозиции гауссовских пучков [7,8]. Если излучатель ультразвука имеет прямоугольную, то для амплитуды давления в жидкой среде справедливо следующее выражение [8]:

$$p^{MGD} = p_0 \frac{d_x d_y}{4\pi} \exp\left(-\frac{\alpha_s}{2} z\right) \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=1}^{10} \frac{A_n A_m}{\sqrt{C_n D_m}} \exp\left(-\frac{x^2}{4C_n} - \frac{y^2}{4D_m}\right), \quad (1)$$

где d_x и d_y – размеры излучателя в направлении осей x и y; α_s – коэффициент затухания акустической волны по мощности; C_n и D_m – коэффициенты, которые интерпретированы авторами как комплексное расстояние в направлении оси z, на котором располагаются виртуальные источники:

$$C_n = B_n \frac{d_x^2}{4} - i\frac{z}{2K}; \quad D_m = B_m \frac{d_y^2}{4} - i\frac{z}{2K}. \quad (2)$$

При брэгговском режиме дифракции излучения на ультразвуке будет наблюдаться только два дифракционных порядка, амплитуды $C_{0,-1}$ которых могут быть определены из уравнений связанных мод [9]:

$$\begin{cases} \dfrac{dC_0}{dz} = -\dfrac{\alpha}{2} C_0 + i\dfrac{q}{2} C_{-1} \exp(i\eta z) \\ \dfrac{dC_{-1}}{dz} = \dfrac{\alpha}{2} C_{-1} - i\dfrac{q^*}{2} C_0 \exp(-i\eta z) \end{cases} \quad (3)$$

с граничными условиями $C_0(z=0)=1$ и $C_{-1}(z=L)=0$, где L – длина области АО-взаимодействия, α – коэффициент поглощения излучения по интенсивности; q – коэффициент связи, пропорциональный амплитуде звукового поля; $\eta=4\pi n(1/\lambda-1/\lambda_0)$ – модуль расстройки волновых векторов от условия фазового синхронизма $F_0=2nV/\lambda_0$. Здесь F – частота ультразвука, n – показатель преломления, V – скорость звука и λ - длина волны излучения.

Предполагалось, что падающий на АО-ячейку пучок ТГц-излучения имеет гауссовскую форму. Поэтому передаточная функция АО-фильтра рассчитывалась как:

$$H(x,y) = |C_{-1}(x,y,0)|^2 \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

при этом эффективность дифракции ξ определялась как интегральная интенсивность дифрагированного излучения (поскольку интегральная интенсивность падающего излучения была нормирована на 1):

$$\xi = \int H(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y. \quad (5)$$

2. Результаты и обсуждение

Акустические и оптические свойства гексана были взяты из работы [11]: n=1.372, α=0.69 см$^{-1}$, ρ=655 кг/м^3, V=1077 м/с, M_2=847·10^{-15} с^3/кг. Из условия брэгговского синхронизма следует, что АО-дифракция может наблюдаться при частоте ультразвука F=22.73 МГц, которой соответствует коэффициент затухания α_s=0.62 см$^{-1}$. Расчёт акустического поля проводился для квадратного излучателя 5x5 мм, а мощность ультразвукового пучка предполагалась равной 1 Вт. Предполагалось также, что излучатель ультразвука находится на расстоянии 3 см от входного окна кюветы, чтобы не перекрывать пучки падающего и дифрагированного излучения.

Передаточная функция $H(x,y)$ приведена на рис. 1. Можно видеть четыре ярких области, соответствующие максимальной интенсивности дифрагированного излучения. Поскольку размер этих областей мал по сравнению с размерами излучателя ультразвука, то ожидалось, что при дифракции широкого пучка ТГц-излучения эффективность дифракции будет существенно меньше.

Дальнейшие расчёты проводились для пучка ТГц-излучения с гауссовским профилем. На рис. 2 приведён график зависимости эффективности дифракции ξ от ширины пучка σ. Видно, что максимальное значение ξ=1.6·10^{-4} соответствует σ<1 мм. Однако столь узкие пучки характеризуются значительной дифракционной расходимостью, что приводит к уменьшению интеграла перекрытия пучка излучения и ультразвукового пучка. Поэтому в эксперименте целесообразно использовать пучок ТГц-излучения с σ>2.5 мм. Как видно из Рис. 2, этому значению соответствует эффективность дифракции ξ=0.7·10^{-4}. Отметим, что это в 15 раз меньше, чем предсказано в работе [11] для однородного звукового пучка: ξ=11·10^{-4} в пересчёте на λ=130 мкм. Однако, в [11] предполагалось, что излучатель располагался вплотную ко входному окну. Если же учесть затухание ультразвука на расстоянии 3 см, то оказалось, что учёт структуры звукового поля привёл к уменьшению эффективности дифракции примерно в 2 раза по сравнению расчётами для однородного звукового пучка.

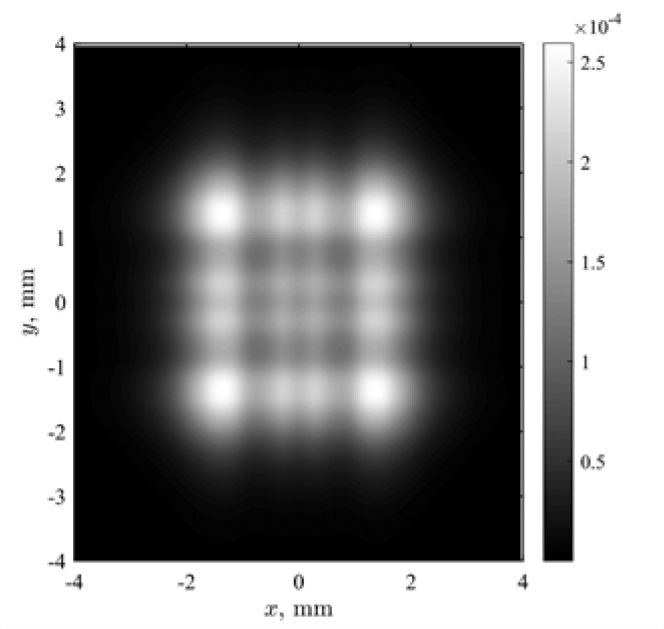


Рис. 1. *Передаточная функция коллинеарного АО-фильтра ТГц излучения с длиной волны 130 мкм.*

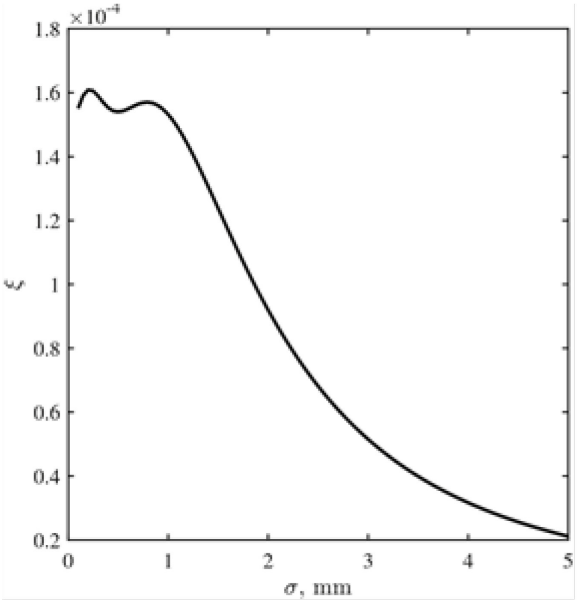


Рис. 2. *Зависимость эффективности коллинеарной дифракции пучка ТГц излучения с гауссовским профилем от ширины этого профиля.*

Выводы

Проведённые расчёты характеристик АО-фильтра ТГц-излучения показали, что структура звукового пучка существенно влияет на его характеристики. Установлено, что наибольшая эффективность АО-дифракции достигается вблизи краёв излучателя ультразвука в то время, как максимальная энергия гауссовского пучка ТГц-излучения сосредоточена в центральной части. Следствием этого является существенно (в 2 раза) меньшая интегральная эффективность дифракции по сравнению с результатами расчётов для однородного звукового поля. Таким образом, для реализации АО-фильтрации ТГц излучения требуется использование значительной управляющей электрической мощности (не менее 10 Вт), а также модифицирование излучателя ультразвука для концентрации акустического поля в центральной части пучка ТГц-излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания № 0057-2019-0006.

Список литературы

1. Sha K., Yang J. // IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelecrics, and Frequency Control. 2003. V. 50. № 7. P. 890.
2. Nikitin P.A., Voloshinov V.B. // Physics Procedia. 2015. V. 70. P. 712.
3. Nikitin P. // J. of Physics: Conf. Series. 2019. V. 1421. P. 012032.

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE OPERATION OF AN ACOUSTO-OPTIC TERAHERTZ RADIATION FILTER BASED ON HEXANE

candidate of physico-mathematical sciences, Nikitin P.A.

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS
nikitin.pavel.a@gmail.com

The acousto-optic diffraction of terahertz radiation by ultrasound in hexane is studied theoretically. The transfer function of the filter for radiation with a wavelength of 130 μm is calculated, in which the ultrasound emitter had a square shape with a side length of 5 mm. It has been found that in the diffraction of terahertz radiation on a real sound beam compared to a homogeneous sound beam, the diffraction efficiency is 2 times less, and the acousto-optic interaction band is the same within the error.

Keywords: acousto-optics, filter, terahertz radiation

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА ПРЕЦИЗИОННОГО ИСТОЧНИКА ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

М.Ф. Булатов[1,2], И.С. Кирюхин[2], Д.В. Чуриков[1]

[1]Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
[2]МИРЭА - Российский технологический университет
kirismirea@mail.ru

В работе рассмотрен дифференциальный метод измерения низкочастотного шума с источника опорного напряжения с использованием полосового частотного фильтра. Результаты исследований подтверждают эффективность предложенного подхода, а также, что соответствие размаха низкочастотного шума исследуемого источника опорного напряжения результатам в сравнении с помощью импортных микросхем.

Ключевые слова: источник опорного напряжения, низкочастотный шум, нестабильность

Введение

Как известно [1] одной из основных причин ограничения рабочих характеристик измерительных приборов и средств связи являются паразитные шумы. При работе стабилизатора напряжения или источника опорного напряжения паразитные шумы приводят к возникновению колебаний синхросигнала, что приводит к нестабильности работы системы в целом.

Для того, чтобы при измерении уровня шума не применять значительное усиление по напряжению с применением малошумящего операционного усилителя и активных фильтров, использование в качестве измерительного устройства осциллографа нецелесообразно.

В работе основное внимание уделено низкочастотным шумам источника опорного напряжения в диапазоне 0,1-10 Гц. Существует два основных метода измерения шумов стабилизаторов напряжения и источников опорного напряжения.

Первый основан на измерении фазового шума тактового генератора, питающегося от тестируемого стабилизатора. Шум стабилизатора напряжения в этом случае выражается в виде амплитудной модуляции и интерференционной картины с частотой генератора. В фазовый шум вносит свой вклад весь шум источника питания, увидеть который можно на общей характеристике, отображаемой непосредственно на дисплее спектроанализатора.

Второй метод требует непосредственных измерений на исследуемом устройстве.

В работе предложен простой и эффективный способ измерения низкочастотного шума источника опорного напряжения. Исследован низкочастотный шум в диапазоне частот 0,1-10 Гц и амплитудой не ниже 10 мкВ.

Измерение шумов опорного напряжения

При наиболее часто используемом способе измерения шумов опорного напряжения выходное напряжение подается в фильтр высоких частот, который блокирует передачу постоянной составляющей опорного напряжения и пропускает в предварительный усилитель только переменный сигнал в заданных частотных пределах. Ряд конструктивных особенностей ограничивают применимость такой схемы, а именно: высокие требования к качеству конденсаторов, наложение шумов входного резистора и усилителя, наличие шумов фильтра высоких частот [2, 3].

Для измерения электрических параметров микросхем источников опорного напряжения будем применять наиболее близкий ГОСТ 18986.23. В соответствии с ним измерение размаха напряжения низкочастотного шума ($U_Ш$) производится дифференциальным методом относительно источника опорного напряжения системы путем непрерывной или дискретной записи. Измерительная система контроля источников опорного напряжения должна соответствовать требованиям ГОСТ 18986.21 со следующими дополнениями:

- измерение $U_Ш$ производится не ранее, чем через 15 минут выдержки источников опорного напряжения в установившемся электрическом и температурном режимах;
- контролируемое напряжение компенсируется эталонным источником опорного напряжения через усилитель, подается на прецизионный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и регистрируется им;
- за размах напряжения низкочастотного шума принимается изменение опорного напряжения от минимального до максимального значения за время не менее 10 секунд в заданном диапазоне частот.

Относительная погрешность измерения напряжения низкочастотного шума должна составлять не более 30%. Погрешность поддержания температуры не хуже ±0.1°С.

Схема измерения шума источника опорного напряжения (ИОН) приведена на рис. 1.

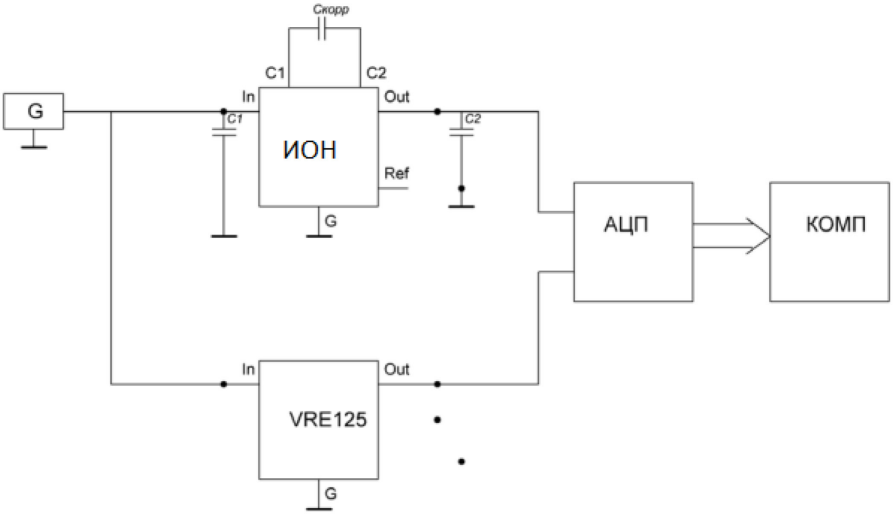


Рис. 1. *Схема измерения шума источника опорного напряжения.*

Здесь в качестве опорного и исследуемого образцов использовались микросхемы VRE125. Согласно документации, размах шума опорного прибора VRE125 не более 3 мкВ. Однако измерения показали значения на уровне 5 мкВ. Размах шума АЦП при коротком замыкании на входе не более 3 мкВ. При экспериментах термостат не использовался и измерения проводились при комнатных условиях в термоизолирущем стакане. На рис. 2 приведены результаты измерений с подключением конденсаторов на входе и выходе (10 мкФ, оранжевый график) и без конденсаторов (синий график). В качестве сравнения приведены измерения ИОН MAX6250 (серый график).

При этом в схеме используется два идентичных источника опорного напряжения для того, чтобы точно определять их низкочастотный шум. Это косвенный метод измерения шума, который основан на предположении, что два разных прибора (одной производственной партии) дают очень близкие шумовые характеристики, в то время как их шумы не коррелированы.

Выводы

Таким образом показано, что условие реализации эффективного прецизионного источника опорного напряжения представляет собой многофакторную задачу. Важнейшим при этом является температура среды и зависящие от нее соответствующие параметры, в том числе низкочастотный шум источника опорного напряжения.

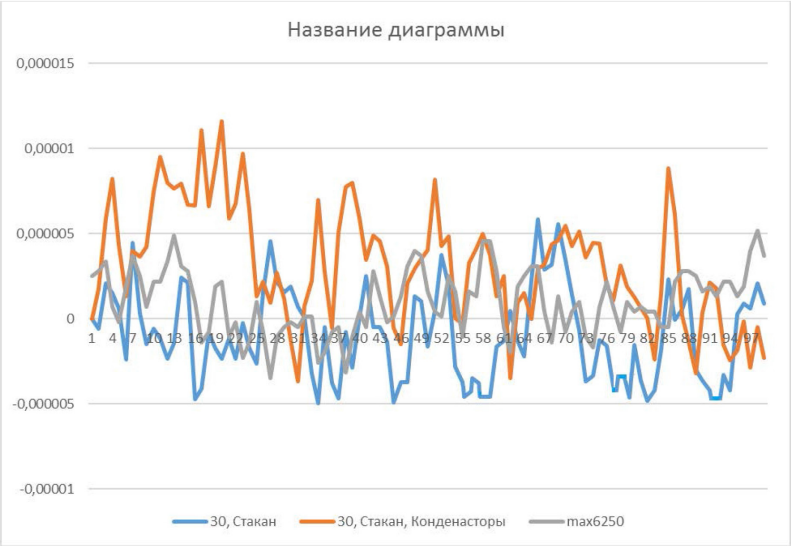


Рис. 2. *Результаты измерения низкочастотного шума источника опорного напряжения.*

Рассмотрены два метода измерения шумов источников питания и опорного напряжения, которые предоставляют значительно больше информации, чем измерения с помощью осциллографа, так как отличаются намного более высокой чувствительностью и позволяют отображать конкретные частоты, вносящие наибольший вклад в шум исследуемого устройства. Особое внимание уделено разработке нового дифференциального метода измерения характеристик шумов с использованием альтернативного источника опорного напряжения и полосового частотного фильтра для диапазона 0.1-10 Гц.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60718X0206).

Список литературы

1. *S. Sandler*, “Use A Signal Analyzer To Measure Power Supply, Regulator, and Reference Noise”, https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21795431/use-a-signal-analyzer-to-measure-power-supply-regulator-and-reference-noise
2. *S. Arar,* “Low-Noise Voltage References: Understanding the Noise Performance of a Voltage Reference IC”, https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/low-noise-performance-voltage-reference-ic/
3. *А. Смородинов*, “Источники опорного напряжения: основные параметры и принципы проектирования” Компоненты и технологии [Электронный ресурс]: Components & Technologies, СПб.: Файнстрит, 2015, №9 (170), 172 с.

DIFFERENTIAL METHOD FOR MEASURING THE AMPLITUDE OF LOW-FREQUENCY NOISE OF A PRECISION REFERENCE VOLTAGE SOURCE

M. F. Bulatov 1,2, I. S. Kiryukhin 2, D. V. Churikov 1

[1] Scientific and Technological Centre of unique instrumentation of the RAS,
[2] MIREA-Russian Technological University
kirismirea@mail.ru

The paper considers a differential method for measuring low-frequency noise from a reference voltage source using a band-pass filter. The research results confirm the effectiveness of the proposed approach, as well as that the range of low-frequency noise of the investigated reference voltage source corresponds to the results in comparison with imported chips.

Keywords: reference voltage source, low-frequency noise, instability

СЕКЦИЯ 4: **БИОМЕДИЦИНСКАЯ ИНФОРМАТИКА**

Руководитель: к.ф.-м.н. **Е.В. Анциперов**

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ IN VIVO ТКАНЕЙ ЭМБРИОНОВ РЫБ

с.н.с, к.т.н., доц. Титов С.А.[1], в.н.с, д.б.н., проф. Бурлаков А.Б.[2], в.н.с., к.ф.-м.н. Зинин П.В.[1], доц., к.т.н., доц. Богаченков А.Н.[3]

[1] Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[3]МИРЭА – Российский технологический университет
sergetitov@mail.ru

Представлена неинвазивная методика измерения скорости звука в тканях эмбрионов низших позвоночных. С помощью высокочастотного ультразвукового сканера с частотой 50 МГц проведено исследование in vivo эмбрионов вьюна, развивающихся непосредственно в иммерсионной ячейке прибора. Для различных стадий развития измерены скорости звука в перивителлиновой жидкости, бластуле и желтке эмбриона.

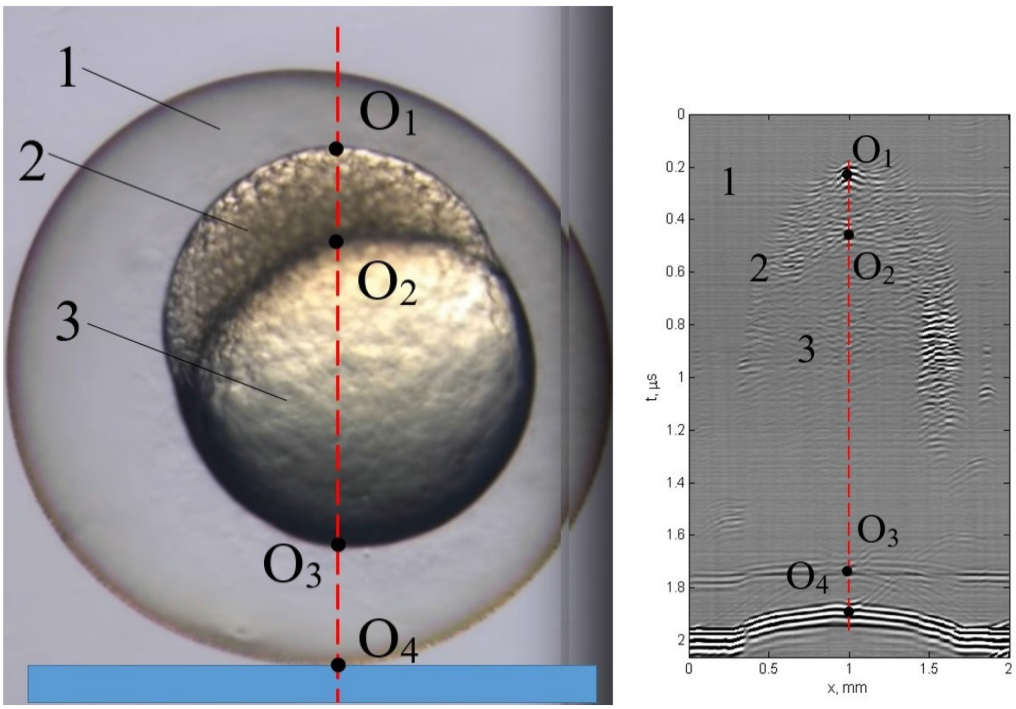
Ключевые слова: ультразвуковая визуализация, скорость звука, эмбрион рыбы

Введение

Эмбрионы рыб становятся все более популярным объектом для исследований в области биологии развития, регенеративной медицине, экологии благодаря сравнительно большому размеру и возможности развития вне родительского организма. Недавно было показано [1-2], что наряду с оптической микроскопией информативным методом исследований эмбриогенеза рыб является высокочастотная ультразвуковая визуализация. Ультразвуковые диагностические волны являются в высшей степени неинвазивными, что позволяет проводить наблюдение *in vivo* одного эмбриона на протяжении многих стадий его развития. Ультразвуковая визуализация дает высокий контраст, обусловленный вариациями упруго-вязкостных свойств тканей, и позволяет наблюдать движение и изменения глубоко расположенных органов. Однако в опубликованных работах сведения об упругих свойствах тканей эмбрионов практически отсутствуют. Данная работа посвящена измерениям скорости звука в перивителлиновой жидкости, желтке и бластуле эмбриона.

1. Методика измерений скорости звука

Структура эмбриона на стадии развития средней бластулы показана на рис. 1 (а).



(а) (б)

Рис. 1. *Схема измерений (а) и ультразвуковой сигнал (б).*

Внутри наружной оболочки эмбриона имеется перивителлиновая жидкость 1, в которой располагаются желток 3 и бластула 2, состоящая из делящихся клеток организма. Общий характерный размер эмбриона рыбы вьюна (*Misgurnus fossilis*) составляет приблизительно 2 мм. Расчет скоростей ультразвука в бластуле и желтке был проведен с помощью модифицированного метода замещения, в котором сравниваются времена прихода сигналов опорного и измерительного лучей. Опорный сигнал со временем прихода t_0 производится лучом, отраженным от подложки вне эмбриона, а измерительный сигнал образуется лучом O_1O_4, проходящим через центр эмбриона. Расстояние от вершины эмбриона до подложки определяется временем распространения опорного сигнала в иммерсионной жидкости:

$$t_4 - t_0 = 2(l_1 + l_2 + l_3)C_0^{-1}, \quad (1)$$

где переменные l_1, l_2, l_3 равны длинам отрезков O_1O_2, O_2O_3, O_3O_4, соответственно, а t_4 есть время прихода сигнала, отраженного от подложки в точке O_4 .

Разность времен распространения опорной и измерительной волн равно:

$$dt = \left[(t_2 - t_3)\Delta C_y + (t_3 - t_4)\Delta C_b\right]C_0^{-1}, \quad (2)$$

где C_0 , $C_0+\Delta C_y$, $C_0+\Delta C_b$ – скорости звука в иммерсионной среде, желтке и бластуле, соответственно, а t_1, t_2, t_3 есть времена прихода волн, отраженных в точках O_1, O_2, O_3, соответственно. Таким образом, зная скорости звука в иммерсионной среде и бластуле, скорость в желтке можно определить, измеряя задержки dt, $(t_2–t_3)$, (t_3-t_4). Скорость в иммерсионной жидкости C_0 известна заранее, а скорость звука в бластуле может быть в результате отдельного эксперимента.

2. Экспериментальное исследование

Ультразвуковые измерения проводились с помощью сканирующего импульсного акустического микроскопа, в котором использовался фокусирующий широкополосный преобразователь с центральной частотой 50 МГц. В приборе ультразвуковая визуализация осуществлялась за счет механического сканирования преобразователя и обеспечивалось пространственное поперечное разрешение 30 мкм. Икринка помещалась в иммерсионной среде на стеклянную подложку. Фокальная плоскость преобразователя, располагаемая на расстоянии 0.8 мм от подложки, проходила приблизительно через середину эмбриона.

Структуру исследуемого эмбриона в продольном направлении отображают пространственно-временные сигналы, представленные рис. 1 (б). В данном формате регистрируемый знакопеременный сигнал отображается оттенками серого в зависимости от времени и координаты сканирования. На изображении выделяется клеточный слой бластулы 2, охватывающий область желтка 3. Амплитуда сигнала, отраженного слоем, является значительной в верхней области бластулы (точки O_1, O_2). Также наблюдается слабый отклик от нижней поверхности желтка со временем прихода t_2, лежащий на оси в области O_3. Отклик от подложки в точке O_4, имеет большую амплитуду вследствие значительного различия акустических импедансов жидкости и подложки.

3. Результаты измерений

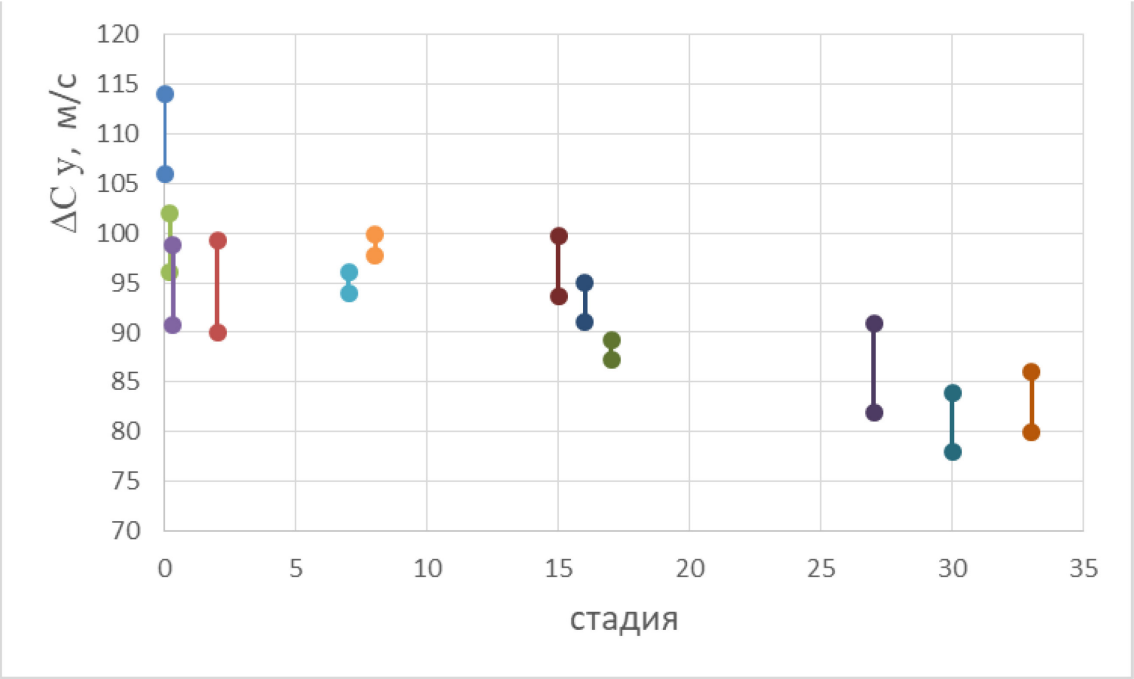


Рис. 2. *Результаты измерения скорости звука желтке в зависимости от стадии развития.*

На рис. 2 показаны результаты измерения скорости звука в желтке. При расчетах по формуле (2) использовалось значение скорости звука в бластуле $\Delta C_b = 41$ м/с. Измерения проводились в разное время для ряда особей, находящихся на разных стадиях развития, начиная с оплодотворения и заканчивая

выклевом. Как видно, что скорость звука находится приблизительно в пределах 85 – 100 м/с, и, несмотря на заметный разброс данных, наблюдается некоторая тенденция ее снижения по мере развития. Сравнивая результаты измерений с опубликованными данными, можно отметить, что полученное значение скорости звука в желтке эмбриона рыбы меньше, чем скорость в плотных тканях других живых организмов таких, как хрящи или хрусталик глаза. Однако она больше скорости звука в тканях мозга или почек и сравнима с тканями печени и мышц.

Выводы

Разработана методика измерения *in vivo* скорости звука в желтке и клеточном слое (бластуле) эмбрионов рыб. Для икры вьюна (*Misgurnus fossilis*) получена оценка скорости в бластуле, которая составила 1526±7 м/с. Найдено, что при развитии эмбриона с 1 до 33 стадий скорость звука в желтке находится в пределах 1575±10 м/с, а скорость звука в перивителлиновой жидкости пренебрежимо мало отличается от скорости в воде.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания № 0069-2019-0009.

Список литературы

1. Burlakov A.B., Khokhlov D.D., Domanskiy V.L., Titov S.A. Study of effects of electromagnetic factors on the early development of biological organisms using comprehensive multispectral optical and scanning acoustic microscopy approach // J. of Physics: Conf. Series. 2019. V. 1421. 012050.
2. Бурлаков А. Б., Хохлов Д. Д., Мачихин А. С., Титов С. А., Ломонов В. А., Виноградов А. В. Исследование динамических процессов в биологических системах методами акустооптической видеоспектрометрии // Радиотехника и электроника. 2020, Т. 65. № 7. С. 717–724.

IN VIVO ULTRASONIC CHARACTERIZATION OF FISH EMBRYO TISSUES

Senior Researcher, PhD, Prof. Associate Titov S.A. [1],
Leading Researcher, DSc., Prof. Burlakov A.B. [2], Leading Researcher, PhD Zinin P.V.[1],
Prof. Associate, PhD, Prof. Associate Bogachenkov A.N. [3]

[1]Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS
[2]Lomonosov Moscow state university
[3]MIREA – Russian Technological university
sergetitov@mail.ru

A non-invasive technique for measuring the speed of sound in tissues of lower vertebrate embryos is presented. Using a high-frequency ultrasound scanner with a frequency of 50 MHz, an in vivo study of loach embryos developing directly in the immersion cell of the device was carried out. For various stages of development, the speeds of sound in the perivitelline fluid, blastula, and yolk of the embryo were measured.

Keywords: ultrasonic visualization, sound velocity, fish embryo.

МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА РАКА КОЖИ

студент Шацкая А.А., асс. Христофорова Ю.А.

Самарский национальный исследовательский университет
khristoforovajulia@gmail.com

В работе представлен мультимодальный метод диагностики рака кожи, основанный на гиперспектральной визуализации, комбинационном / флуоресцентном анализе. В проведенном *in vivo* исследовании приняли участие более 50 пациентов с различными опухолями кожи. Для каждого оптического подхода и совместного их применения были рассчитаны точности дифференциации новообразований. Предлагаемый мультимодальный анализ позволяет достичь более 98% точности дифференциации, что подтверждает его высокий клинический потенциал для изучения опухолей кожи.

Ключевые слова: комбинационное рассеяния, флуоресценция, гиперспектральнаявизуализация, спектральный анализ

Введение

Проблема высокой смертности от онкологических заболеваний состоит в отсутствии ранней достоверной и точной диагностики неопластических процессов [1]. Современные подходы морфологической диагностики в полной мере не решают данной проблемы, т.к. не позволяют ставить точные диагнозы на ранних стадиях развития заболевания. Оптическая диагностика позволяет осуществлять постадийное исследование дляидентификации типа и выделения точных границ новообразования. Методгиперспектральной визуализации (HSI) [2] позволяет одновременно получать изображения области опухоли и спектральные данные обратного рассеяния в видимой области. Изображение опухоли позволяет оценить морфологию ткани и определить стадию роста, в то время как спектральные данные позволяют сделать вывод о химическом составе исследуемых участков ткани. Высокой чувствительностью к биохимическим особенностям компонентного состава обладают методы комбинационного рассеяния (КР) и флуоресценция [3]. КР связано с неупругим рассеянием света при взаимодействии фотонов с колебательными и вращательными состояниями молекулярных связей в клетках и тканях исследуемых образований. Поэтому при развитии патологии, химические и структурные изменения в молекулах тканиотражаются на зарегистрированных спектрах. Использование принципов КР и флуоресценции в сочетании с гиперспектральной визуализацией может обеспечить высокоточный комплексный анализ морфологических и биохимических свойствподозрительных участков кожи с целью выявления злокачественных новообразований кожи.

Материалы и методы

In vivo исследование опухолей кожи проводилось в Самарском областном клиническом онкологическом диспансере. Более 50 пациентов с различными опухолями кожи (злокачественная меланома ММ, базальноклеточный рак ВСС, доброкачественные опухоли, пигментированные невусы и т. д.) были вовлечены в это исследование. Протокол исследования был утвержден этическим комитетом Самарского государственного медицинского университета.

Для регистрации гиперспектральных изображений тканей кожи использовался акустооптический видеоспектрометр. Камера системы HSI разработана в Научно-технологическом центре уникального приборостроения РАН (г. Москва, Россия). Подробное описание камеры на основе акустооптического фильтра можно найти в работе [2]. Используя HSI камеру, можно получить изображение на произвольно заданной длине волны λ в диапазоне 440-750 нм со спектральным разрешением 2,5 нм и пространственным разрешением 0,14 мм.

Спектроскопическая система, сочетающая принципы КР и флуоресценции, включаеттермостабилизированный диодный лазерный модуль LML-785.0RB-04 (λex= 785 ± 0,1 нм), оптический зонд InPhotonics, портативный спектрометр QE65 Pro, оптические волокна и ПК [4]. Лазерное пятно возбуждающего источника составляет 3,5 мм при интенсивности лазерного излучения 1,5 Вт/см^2 на поверхности кожи. Спектрыновообразований были зарегистрированы в области 780−1000 нм со спектральным разрешением 0,2 нм. Время накопления спектров для каждого новообразования составляло 20 секунд с трехкратным накоплением.

Результаты

Зарегистрированные HSI изображения позволяют провести детальный анализ изменения цвета опухоли и пространственного распределения хромофоров кожи. Спектры злокачественных опухолей кожи имеют значимые особенности в области поглощения гемоглобина и меланина (530–570 нм) и в области поглощения одного меланина (600–670нм). В каждой точке изображения на конкретной длине волны была рассчитана оптическая плотность OD:

$$OD(x,y,\lambda)=\lg\frac{I_0(x,y,\lambda)}{I(x,y,\lambda)}, \quad (1)$$

где $I_0(x,y,\lambda)$ – интенсивность обратного рассеяния от белого эталонного рассеивателя(молочной пластины Ф0-1), $I(x,y,\lambda)$ – интенсивность обратного рассеяния от измеряемого образца.

На основании значений OD были рассчитаны интегральные индексы, пропорциональные концентрациям хромофора в коже, которые позволили сформировать пространственное распределение меланина и гемоглобина (для гемоглобина – индекс H: λ∈[530;570]), для меланина - индекс M: λ∈[600; 670])) [2]:

$$I_i(x,y)=\frac{1}{\lambda_1-\lambda_2}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}OD(x,y,\lambda)d\lambda. \quad (2)$$

На рисунках 1 (а, б) представлены карты индексов меланина и гемоглобина соответственно для злокачественной меланомы. Сочетание индексов дает визуальное представление о степени злокачественности новообразования.

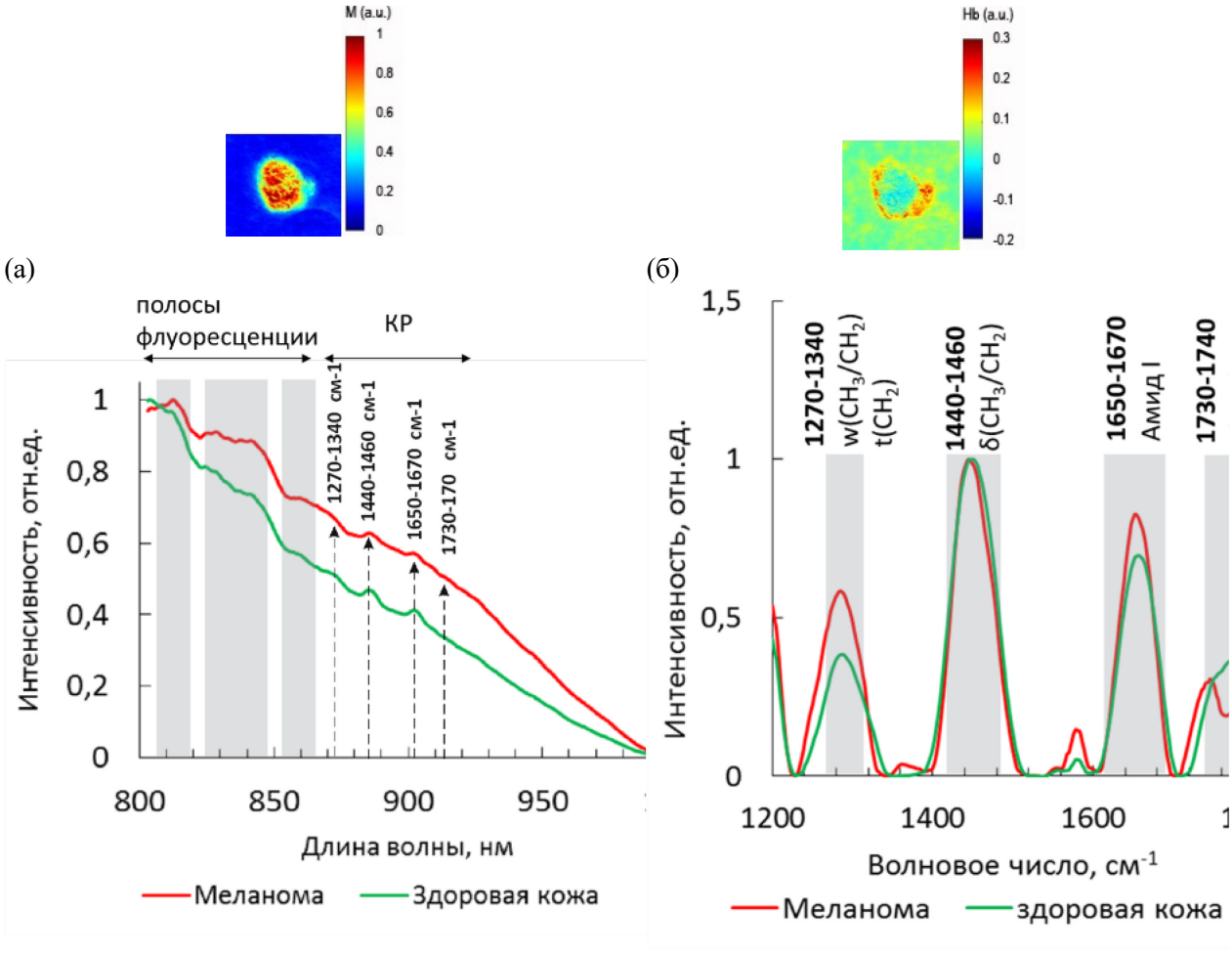


Рис. 1. Оптический анализ меланомы: карты распределения (а) меланина и (б) гемоглобина, рассчитанные для гиперспектральных изображений, (в) спектры КР на фоне флуоресценции и (г) спектры КР.

На рисунке 1 (в) представлены нормированные спектры КР кожи на фоне широкополосной флуоресценции и спектры КР кожи, полученные при вычитании флуоресценции из зарегистрированного спектра с помощью ванкуверскогоалгоритма. Анализ спектральных данных был проведен с помощью многомерного статистического метода частичных наименьших квадратов с дискриминантным анализом (PLS-DA) [5]. Метод PLS-DA позволяет построить регрессионную модель для идентификации спектров по классам новообразований на основе выделенных спектральных различий

В таблице 1 представлены результаты дифференциации различных опухолей кожиосновании оптических показателей для каждого метода отдельно, а также для совместного их применения.

Таблица 1. Результаты дифференциации новообразований кожи.

Классы	КР/флуорспектроскопия	HSI	КР/флуор+HSI
злокачественные (n=36) –доброкачественные (n=19)	90%	80%	>98%
Меланома (n=19) – другие новообразования кожи (n=36)	90%	80%	>96%

Выводы

Применение мультимодального оптического подхода может позволить более подробнонеинвазивно исследовать особенности новообразований кожи. HSI позволяет получить комплексное изображение новообразования с распределением хромофоров кожи как внутри опухоли, так и на границе с окружающей здоровой кожей. Спектроскопия КР ифлоресценции позволяет собрать информацию из локальных точек поверхности кожи. Таким образом, HSI позволяет определить область опухоли с подозрением на злокачественность, которая в дальнейшем более подробно может быть исследована с помощью методов спектрального анализа. Результаты проведенного анализа позволяют классифицировать опухоли кожи, используя одновременно спектральные характеристики малигнизации тканей, нетипичные структуры и пространственные морфологическиеособенности.

Список литературы

1. Ермаков, А.В. Ранняя диагностика и профилактика злокачественной меланомы / А.В. Ермаков // Онкохирургия. – 2013. – Т. 5, № 3. – С. 52-58.
2. Шерендак, В.П. Гиперспектральный in vivo анализ хромофоров нормальной кожи ивизуализация онкологических патологий / В.П. Шерендак, И.А. Братченко, О.О. Мяки-нин, П.Н. Вольхин, Ю.А. Христофорова, А.А. Морятов, А.С. Мачихин, В.Э. Пожар, С.Г.Козлов, В.П. Захаров // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 661-670.
3. Pence, I. Clinical instrumentation and applications of Raman spectroscopy / I. Pence and A. Mahadevan-Jansen // Chem. Soc. Rev. – 2016. – Vol. 45. – P. 1958-1979.
4. Khristoforova, Y. Portable spectroscopic system for in vivo skin neoplasms diagnostics by Raman and autofluorescence analysis / Y. Khristoforova, I. Bratchenko, O. Myakinin, D. Artemyev, A. Moryatov, A. Orlov, S. Kozlov, V. Zakharov // J Biophotonics. – 2019. – Vol. 12(4). – P. e201800400.
5. Wold, S. PLS-regression: a basic tool of chemometrics / S. Wold, M. Sjöströma, L. Erikssonb // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2001. – Vol. 58(2). – P. 109-130.

MULTIPARAMETRIC SPECTRAL DIAGNOSTICS OF SKIN CANCER

stud. Shatskaya A.A., ass. lecturer Khristoforova Y.A.

Samara national research university
khristoforovajulia@gmail.com

The multimodal method of skin cancer diagnostics based on the hyperspectralvisualization, Raman scattering and near-infrared fluorescence was presented in this paper. Thefifty patients with different skin neoplasms were involved in this study. The differentiating accuracy for each optical modality was calculated based on the specific spectral criteria. The proposed multimodal analysis allows one to achieve more than 98% accuracy that proves its high clinical potential for morphological and biochemical analysis of skin tissues.

Keywords: Raman scattering, fluorescence, hyperspectral visualization, spectral analysis

СРАВНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ВСПЛЕСКООБРАЗНЫХ БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ АНАЛИЗА

к.т.н., с.н.с. Сушкова О.С. [1], к.ф.-м.н., с.н.с. Морозов А.А.[1], к.б.н., с.н.с. Габова А.В.[2], к.м.н., врач-невролог Карабанов А.В.[3], к.м.н., с.н.с., врач-невролог Чигалейчик Л.А.[3]

[1]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
[2]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН
[3]ФГБНУ «Научный центр неврологии»
o.sushkova@mail.ru, morozov@cplire.ru, agabova@yandex.ru, doctor.karabanov@mail.ru, chigalei4ick.lar@yandex.ru

Проведено сравнение метода анализа всплескообразных биомедицинских сигналов со спектральным методом анализа на основе данных акселерометра, полученных на пациентах с болезнью Паркинсона. Сравнение показало, что эти методы выявляют существенно разные свойства сигналов и могут взаимно дополнять друг друга.

Ключевые слова: метод анализа всплескообразных биомедицинских сигналов, акселерометр, болезнь Паркинсона, всплески, вейвлет-анализ, спектральный анализ

Введение

Метод анализа всплескообразных биомедицинских сигналов предназначен для изучения частотно-временных характеристик электрической активности мышц и коры головного мозга [1-3]. Отличительной особенностью метода является то, что анализируются не исходные сигналы, а всплески на вейвлет-спектрограммах. В отличие от стандартного вейвлет-анализа, метод анализа всплескообразных биомедицинских сигналов позволяет выявлять свойства электрофизиологических сигналов на протяжении длительных интервалов времени, и при этом, по сравнению с Фурье-анализом, учитывать локальные частотно-временные изменения характеристик нестационарных сигналов.

Для сравнения методов были взяты сигналы акселерометра у группы пациентов с болезнью Паркинсона (БП) (18 человек) и контрольных испытуемых (22 человека). Датчик акселерометра был установлен на правых руках пациентов. В исследовании принимали участие пациенты с БП с 1 стадией заболевания по шкале Хен-Яра. На 1 стадии дрожание проявляется только на одной стороне тела, вторую сторону тела можно считать условно здоровой. Исследование «здоровых» рук пациентов с БП представляет значительный интерес для разработки методов ранней диагностики БП, поскольку «здоровые» руки пациентов с БП могут использоваться в качестве модели процессов, происходящих на доклинических стадиях БП [4]. Именно по этой причине для сравнения методов был использован сигнал с правых «здоровых» рук пациентов, а не с левых рук, где проявляется патологический тремор. Методику измерений и схему установки датчиком см. в [5]. Для примера был исследован диапазон частот от 0,5 до 4 Гц, который представляет существенный интерес для нейрофизиологов [6].

Рассмотрим спектры, построенные при помощи стандартного метода Велча (было взято окно Ханна, длина окна 10 секунд, перекрытие окна 7/8, частота дискретизации 1378,125 Гц). Рассмотрим в качестве примера спектры правых «здоровых» рук пациентов с БП с дрожательным гиперкинезом на левых руках и правых рук контрольных испытуемых (рис. 1) в диапазоне 0,5-5 Гц. Ось абсцисс – частота, ось ординат – спектральная плотность мощности (СПМ). Тонкая линия вокруг спектра – доверительный интервал в 2 сигмы. Три линии под рисунком показывают результаты статистического теста Манна-Уитни. Нижняя линия соответствует статистическому тесту Манна-Уитни (альфа-уровень 0,05), средняя и верхняя линии соответствует статистическому тесту Манна-Уитни с поправкой Бонферрони на количество частот в спектрах (51). Видно, что СПМ выше у пациентов с БП (рыжая сплошная линия), чем у контрольных испытуемых (зелёная пунктирная линия). Тест Манна-Уитни показывает, что на некоторых частотах в рассматриваемом диапазоне частот наблюдаются статистически значимые отличия ($p<0.05$), однако поправку Бонферрони эти отличия не проходят.

Далее сравним количество всплесков у пациентов с БП с данными здоровых испытуемых с помощью AUC-диаграмм, применяемых в методе [1-3].

Пример частотной AUC-диаграммы на основе данных акселерометра для правых «здоровых» рук пациентов с БП с дрожательным гиперкинезом на левых руках и для правых рук контрольных испытуемых представлен на рис. 2. На диаграмме при помощи цвета показаны значения AUC. Синий цвет означает, что $AUC<0.5$, то есть количество всплесков у пациентов меньше, чем у контрольных

испытуемых. Зелёный цвет обозначает AUC близкий к 0.5. При построении диаграммы отбирались только те всплески, полосы частот которых (полуширина на полувысоте) больше 0.5 Гц.

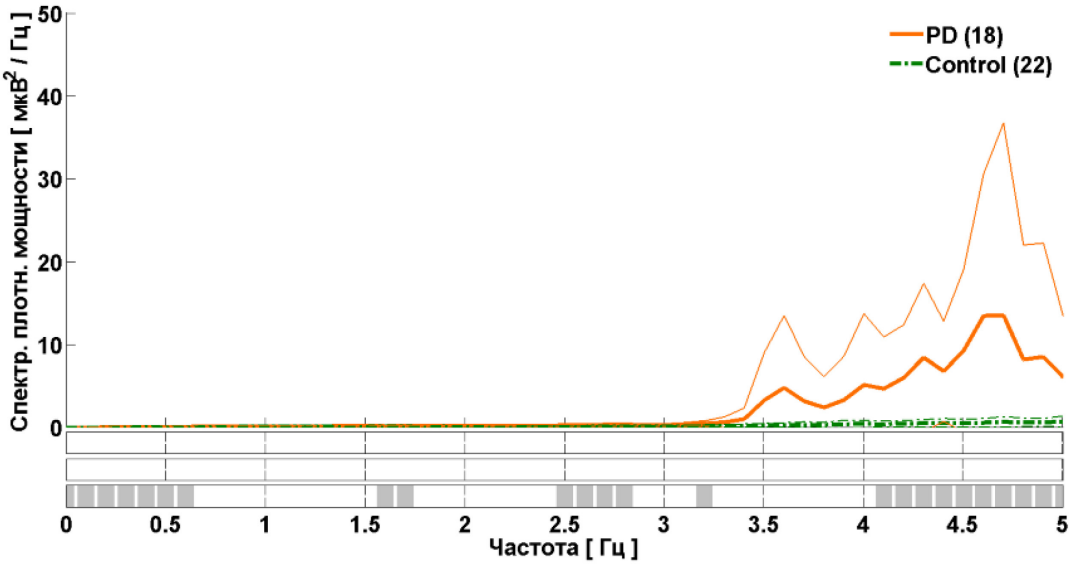


Рис. 1. Сравнение спектров правых «здоровых» рук пациентов с БП с дрожательным гиперкинезом на левых руках и правых рук контрольных испытуемых. Рассматривается диапазон частот 0,5-5 Гц.

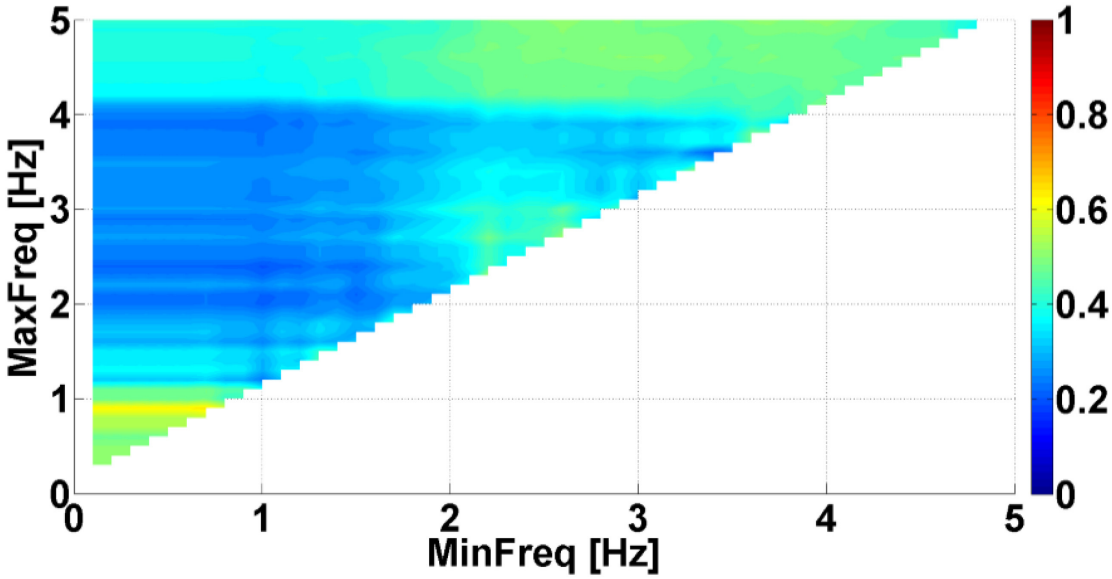


Рис. 2. AUC-диаграмма на основе данных акселерометра для правых «здоровых» рук пациентов с БП с дрожательным гиперкинезом на левых руках и правых рук контрольных испытуемых. Ось абсцисс – нижняя граница диапазонов частот, ось ординат – верхняя граница диапазонов частот. Рассматриваются частоты 0.5-5Гц с шагом 0.1 Гц.

На диаграмме хорошо видно синее пятно. При этом спектр (см. рис. 1) в этом частотном диапазоне у пациентов с БП выше, чем у контрольных испытуемых. Таким образом, сравнение спектров и AUC-диаграмм выявляет парадоксальную закономерность. В данном частном диапазоне СПМ у пациентов увеличена, при этом однако количество всплесков уменьшается. Возможным объяснением этого является то, что количество всплесков уменьшилось, но при этом их амплитуда выросла. Заметим, что данный вывод можно сделать только путём сопоставления результатов применения обоих методов. Видно, что эти методы извлекают существенно разную информацию из сигналов, поэтому одновременное применение этих двух методов позволяет сделать новые интересные выводы о структуре биомедицинских сигналов, чего нельзя сделать, используя эти методы по отдельности.

Выводы

Сравнение метода анализа всплескообразных биомедицинских сигналов со спектральным методом анализа на основе данных акселерометра, полученных на пациентах с болезнью Паркинсона, показало, что эти методы выявляют существенно разные свойства сигналов и могут взаимно дополнять друг друга. Полученные результаты на «здоровых» руках пациентов с БП на основе данных акселерометра являются перспективными для ранней диагностики БП.

Благодарности
Авторы благодарны Е.М. Тиманину (ИПФ РАН), разработчику акселерометра [7].
Работа выполнена в рамках государственного задания. Исследование выполнено при поддержке стипендии Президента РФ молодым учёным и аспирантам № СП-5247.2018.4 и частично поддержано Российским фондом фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-37-20021.

Список литературы

1. Sushkova O.S., Morozov A.A., Gabova A.V. Data mining in EEG wave trains in early stages of Parkinson's disease // Advances in Soft Computing: MICAI 2016 / Obdulia Pichardo-Lagunas, Sabino Miranda-Jimenez (Eds.). – Springer, 2017. – V. 10062 LNAI, pp. 403-412.
2. Sushkova O.S., Morozov A.A., Gabova A.V., Karabanov A.V. Investigation of Surface EMG and Acceleration Signals of Limbs' Tremor in Parkinson's Disease Patients Using the Method of Electrical Activity Analysis Based on Wave Trains // Advances in Artificial Intelligence: IBERAMIA 2018 / G.R. Simari, F. Eduardo, F. Gutiérrez Segura, J.A. Rodríguez Melquiades (Eds.). – Springer, 2018. – V. 11238 LNAI, pp. 253-264.
3. Сушкова О.С., Морозов А.А., Габова А.В., Карабанов А.В. Применение метода анализа всплескообразной электрической активности мозга для выявления особенностей ЭЭГ пациентов на ранней стадии болезни Паркинсона // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова, 2018. – Т. 118, № 7. – С. 45-48.
4. Andreeva Y., Khutorskaya O. EMGs spectral analysis method for the objective diagnosis of different clinical forms of Parkinson's disease // Electromyography and Clinical Neurophysiology, 1996. – V. 36(3). – pp. 187-192.
5. O.S. Sushkova, A.A. Morozov, A.V. Gabova, A.V. Karabanov. Investigation of the multiple comparisons problem in the analysis of the wave train electrical activity of muscles in Parkinson's disease patients // Journal of Physics: Conference Series. - IOP Publishing Ltd, 2019. – V. 1368, Issue 5, pp. 052004.
6. Sushkova O.S., Morozov A.A., Gabova A.V., Karabanov A.V., Chigaleychik L.A. Investigation of the 0.5-4 Hz low-frequency range in the wave train electrical activity of muscles in patients with Parkinson's disease and essential tremor // RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies. – 2019. – V. 11, No. 2. – pp. 225-236.
7. Timanin E.M., Gustov A.V., Eremin E.V. (2013) Patent no. 2483676. Russian Federation. Device for complex analysis of different types of human tremor. 10.06.2013.

COMPARISON OF THE METHOD OF ANALYSIS OF WAVE TRAIN BIOMEDICAL SIGNALS WITH THE SPECTRAL METHOD

PhD (tech.) Sushkova O.S.[1], senior researcher, PhD (phis.-math.) Morozov A.A.[1], senior researcher, PhD (bio.) Gabova A.V.[2], doctor-neurologist, PhD (med.) Karabanov A.V.[3], senior researcher, doctor-neurologist, PhD (med.) Chigaleychik L.A.[3]

[1]Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS
[2]Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS
[3]FSBI «Research Center of Neurology»
o.sushkova@mail.ru, morozov@cplire.ru, agabova@yandex.ru, doctor.karabanov@mail.ru, chigalei4ick.lar@yandex.ru

A comparison of the wave train biomedical signal analysis method with the spectral method was carried out. The comparison was based on accelerometer data in patients with Parkinson's disease. The comparison demonstrated that these methods reveal substantially different features of signals and can complement each other.

Keywords: method of analysis of wave train biomedical signals, accelerometer, Parkinson's disease, wave trains, wavelet analysis, spectral method

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ КЛАССИФИКАЦИЕЙ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОРУЖИЯ И ДРУГИХ ОПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ, СКРЫТЫХ ПОД ОДЕЖДОЙ ЧЕЛОВЕКА

к.ф.-м.н., с.н.с. Морозов А.А., к.т.н., с.н.с. Сушкова О.С., м.н.с. Кершнер И.А.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
morozov@cplire.ru, o.sushkova@mail.ru

Созданы открытый набор терагерцовых видеоданных и программная платформа для экспериментов с интеллектуальным терагерцовым видеонаблюдением. Набор видеоданных включает короткие видеоролики людей, у которых под одеждой спрятаны предметы. Набор данных является мультимодальным; он содержит синхронизированные видео различных видов: терагерцовые, тепловизионные, видимые, ближнего инфракрасного диапазона и 3D. Специальная программная платформа разработана для сбора и предварительной обработки видеоданных. Программная платформа содержит транслятор языка Акторный Пролог в Java и библиотеку встроенных классов с открытым исходным кодом для сбора и обработки данных. В частности, программное обеспечение позволяет проецировать терагерцовые и тепловизионные видеоданные на трёхмерные облака точек, используя трёхмерные таблицы соответствий. Описан эксперимент с анализом терагерцовых видеоданных на основе различных архитектур CNN.

Ключевые слова: терагерцовое видеонаблюдение, обнаружение скрытых предметов, нейронные сети, Акторный Пролог

Терагерцовое видеонаблюдение открывает новые возможности в сфере обеспечения безопасности в общественных местах, поскольку позволяет обнаруживать скрытое оружие и другие опасные предметы и тем самым предотвращать их использование. Хотя первое поколение терагерцовых систем видеонаблюдения уже создано и доступно на рынке систем обеспечения безопасности, оно до сих пор не нашло широкого применения. Главной причиной этого является то, что существующие методы анализа терагерцовых изображений не способны обеспечить скрытое и полностью автоматическое распознавание оружия и опасных предметов и могут использоваться только под управлением специально обученного оператора. В результате, терагерцовое видеонаблюдение оказывается более затратным и менее эффективным, чем традиционные методы организации периметра безопасности и ручного досмотра посетителей. В статье рассматривается проблема создания метода автоматического анализа терагерцовых видеоизображений. В качестве основы для такого метода предложено использовать принцип семантического слияния видеоизображений, полученных с помощью разных физических принципов, идея которого заключается в том, что смысловое содержание одного видеоизображения используется для анализа другого видеоизображения. Например, информация о положении человека в пространстве, координатах его рук, ног и туловища может быть использована для анализа и интерпретации цветовых областей, наблюдаемых на терагерцовом изображении. Для реализации принципа семантического слияния видеоизображений созданы средства объектно-ориентированного логического программирования, включающие специальные классы для сбора, обработки и анализа видеоизображений в видимом, инфракрасном и терагерцовом диапазонах, а также трёхмерных видеоизображений, получаемых с помощью времяпролётных камер. Для экспериментов с терагерцовым и многомодальным видеонаблюдением были разработаны специальные средства логического программирования, включающие набор встроенных классов языка Акторный Пролог для получения, записи и чтения терагерцовых, тепловых, визуальных и 3D видеоизображений [1-4].

Проведены эксперименты с нейросетевой классификацией субтерагерцовых изображений оружия и других опасных предметов, скрытых под одеждой человека. Цель экспериментов – выяснить, содержит ли терагерцовое видеоизображение достаточное количество информации, чтобы научить нейросеть различать опасные и неопасные предметы. Обучающая выборка включала изображения людей в домашней и уличной (в том числе, зимней) одежде. Под одеждой были спрятаны оружие и опасные предметы, такие как автомат Калашникова, топор, бутылки, нож, резиновая дубинка и пистолеты различных марок (рис. 1), а также обычные бытовые предметы, такие как телефоны и USB-диски, размер обучающей выборки 9173 кадра, размер тестовой выборки 2293 кадра. Нейронные сети, обученные на этом множестве данных, были применены для анализа другого множества данных, включающего винтовку M16 (рис. 2), размер выборки 672 кадра.

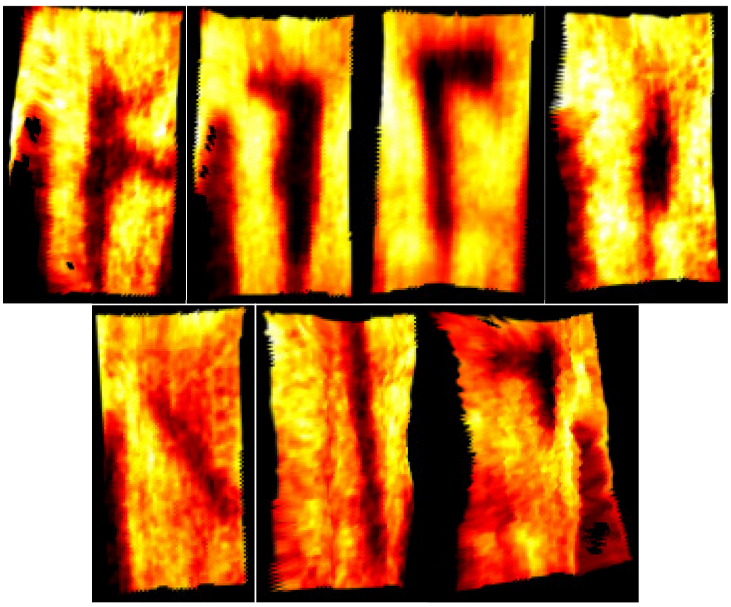


***Рис. 1** – Обучающая выборка включает в себя оружие и другие опасные предметы (слева направо): автомат Калашникова (АК), АК без магазина, топор, бутылки, нож, дубинку и пистолеты разных марок.*

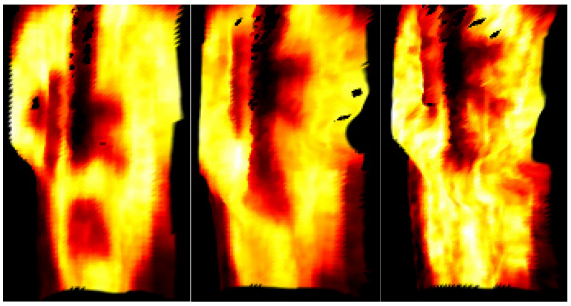


***Рис. 2.** Терагерцовые изображения человека, который держит автоматическую винтовку M16.*

Нейронные сети сумели успешно определить, что винтовка является опасным предметом (accuracy от 75 до 99% на разных архитектурах сетей). Результаты экспериментов показывают, что нейронные сети могут быть использованы для обобщения свойств терагерцовых видеоизображений и могут успешно предсказывать, является ли скрытый под одеждой предмет опасным.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Р.А. Толмачёвой, Г.К. Мансурову, В.Е. Анциперову и В.А. Кершнеру за участие в проводимых экспериментах, а также компаниям ЗАО «Астрон» и ООО «АСофт» за предоставленное оборудование терагерцового излучения THERZ-7A. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 18-07-01295 А и № 16-29-09626 офи-м (www.fullvision.ru).

Список литературы

1. Morozov A.A., Sushkova O.S., Kershner I.A., Polupanov A.F. Development of a method of terahertz intelligent video surveillance based on the semantic fusion of terahertz and 3D video images // CEUR, 2019. – V. 2391. – Paper 19. – URL: http://ceur-ws.org/Vol-2391/paper19.pdf
2. Murashov D.M., Morozov A.A., Murashov F.D. A technique for detecting concealed objects in terahertz images based on information measure // CEUR, 2019. – V. 2391. – Paper 37. – URL: http://ceur-ws.org/Vol-2391/paper37.pdf
3. Morozov A.A., Sushkova O.S., Polupanov A.F., Antsiperov V.E., Mansurov G.K., Paprotskiy S.K., Yanushko A.V., Petrova N.G., Bugaev A.S. Semantic fusion and joint analysis of terahertz and 3D video images by the means of object-oriented logic programming // RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies, 2018. – V. 10, No. 2. – p. 329-340. – DOI: 10.17725/rensit.2018.10.329, URL: http://en.rensit.ru/vypuski/article/259/10(2)329-340e.pdf
4. Morozov A.A., Sushkova O.S. Development of a Publicly Available Terahertz Video Dataset and a Software Platform for Experimenting with the Intelligent Terahertz Visual Surveillance // Advances in Intelligent Systems and Computing: the International Conference on Frontiers in Computing and Systems (COMSYS-2020, January 13-15, 2020, Jalpaiguri, West Bengal, India) / Debotosh Bhattacharjee, Dipak Kumar Kole, Nilanjan Dey, Subhadip Basu, and Dariusz Plewczynski (Eds.). / Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020. – Advances in Intelligent Systems and Computing. – Принято в печать.

EXPERIMENTS WITH THE NEURAL NETWORK CLASSIFICATION OF SUBTERAHERTZ IMAGES OF WEAPONS AND OTHER DANGEROUS OBJECTS HIDDEN UNDER THE CLOTHING

PhD (phis.-math.) Morozov A.A., senior researcher, PhD (tech.) Sushkova O.S., junior researcher Kershner I.A.

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS
morozov@cplire.ru, o.sushkova@mail.ru

A publicly available terahertz video dataset and a software platform for experimenting with the terahertz intelligent video surveillance are developed. The video dataset includes short videos of people with objects hidden under the clothing. The dataset is multimodal, that is, it contains synchronized videos of various kinds: terahertz, thermal, visible, near-infrared, and 3D. A special software platform is developed for the acquisition and preprocessing of the video data. The software platform includes a translator of the Actor Prolog language to Java and an open-source library of built-in classes for data acquisition and processing. In particular, the software enables one to project terahertz/thermal video data onto three-dimensional point clouds using 3D lookup tables. An experiment with the terahertz video data analysis based on various CNN architectures is described.

Key words: terahertz video surveillance, hidden object detection, neural networks, Actor Prolog

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ COVID-19 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

аспирант Смирнов К.В., д.ф-м.н. Вытовтов К.А., Барабанова Е.А.

Астраханский государственный технический университет
cmuphob.k@gmail.com

Целью данной работы является описание основных проблемы связанных с идентификацией COVID-19. Попытаться повторить выводы существующих статей на тему диагностирования COVID-19 с применением метода машинного обучения. Вынести предположения по оптимизации существующих решений для идентификации. Построить план по развитию, существующих и выработанного в ходе работы решения. Назначение решения: Потенциальное решение на основе CXR или CT и их анализе с помощью ИИ может помочь медработникам быстрее идентифицировать COVID-19 и облегчить правильное использование ресурсов.

Ключевые слова: COVID-19; Автоматическое обнаружение; Рентгеновские снимки; КТ изображения; Сверточные нейронные сети; Глубокое обучение

Введение

В конце 2019 года мир узнал о вирусной инфекции COVID-19. Представляет собой опасное заболевание, которое может протекать как в форме острой респираторной вирусной инфекции лёгкого течения, так и в тяжёлой форме, специфические осложнения которой могут включать вирусную пневмонию, влекущую за собой острый респираторный дистресс-синдром или дыхательную недостаточность с риском смерти. На 5 апреля 2020 года более половины населения всего мира находится на карантине. Более 1 200 000 зараженных, и более 5 500 смертей в сутки. Диагностика COVID-19 занимает от 12 до 24 часов, это долгое ожидание очень неэффективно и опасно для лиц окружающих диагностируемого, в этот период поставщики

медицинских услуг нуждаются в информации для поддержки принятия решений. На основании статей опубликованных Китайскими командами исследователей [5] и [6] COVID, лучше диагностируется с помощью рентгенологической визуализации.

1. Сбор данных

Небольшой набор данных — это самая большая слабость этого исследования, их очень мало в открытом доступе. Если изображений случаев с известными миру ранее типами пневмонии достаточно для построения хорошего набора данных, то с COVID, нашлось всего несколько ресурсов [1], [3]

Набор данных для обучения и валидации состоит из 6121 изображения из них 199 - изображения с COVID-19 и 4337 изображений других форм пневмонии.

Данные собраны из проверенных источников: Kaggle [3] - система организации конкурсов по исследованию данных, а также социальная сеть специалистов по обработке данных и машинному обучению; Инициатива доктора компьютерных наук - Joseph Paul Cohen PhD [1]. Попытался собрать данные со всех именитых источников и представить в открытом доступе через GitHub.

2. Разработка

Обучение модели машинного обучения осуществлено на основе фреймворка CreateML от Apple и апробировано по средствам тестирования модели на снимках случаев COVID-19 не входящих в исходный набор данных [3].

В ходе подготовки данной работы было создано приложение для MacOS. Приложение позволяет: выгрузить данные из ресурса [1] и прочитать данные файла CSV для загрузки изображений в локальную папку компьютера или предложить свой набор данных структурированных в виде трех папок: [COVID-19] - случаи с COVID-19 [others] - случаи с другими видами пневмоний [No Finding] - снимки без пневмоний; обучить модель на основании подготовленных данных; провести валидацию модели; выбрать отдельное изображение для предсказания заболевание на его основе; просмотр папки с загруженными из сети набором данных и сгенерированной моделью в формате .mlmodel.

Первая тренировка модели была осуществлена на структуре данных [«COVID-19», «No Finding», «ARDS», «SARS», «Pneumocystis», «Streptococcus», «Klebsiella», «Chlamydophila», «E.Coli», «Legionella»]. Каждая папка описывает характерный для нее случай пневмонии. Результаты тренировки и валидация модели представлены в таблице 1. Количество изображений в первоначальной выборке составляло 256. По результату валидации точность модели была достигнута 99%. Валидация происходила на 20% данных из исходных данных.

Вторая тренировка модели была осуществлена на структуре папок [«COVID-19», «No Finding», «others»]. В данной структуре все случаи пневмонии отдельные от COVID-19 были выделены в отдельную выборку. Гипотеза: выделить в модели отдельно, характерные признаки COVID-19 от остальных типов заболеваний вызывающих пневмонию. Точность сгенерированной модели упала до 93%.

Финальное тестирование было проведено на большем количестве данных с большим количеством тестов, количество изображений для тренировки составляло 6121 изображение из них 199 - изображения с COVID-19 и 4337 изображений других форм пневмонии. Точность модели понизилась до 92% (обучение представлено в таблице 2), но и выборка увеличилось на несоизмеримо большие цифры, с большим количеством данных для валидации. Проводя анализ матрицы ошибок (таблица 3), видно, что для 199 случаев с COVID-19 модель идентифицировала 135 случаев с COVID-19 и 62 с другими формами пневмонии и всего 2 ошибки можно назвать фатальными - нейронная сеть не дифференцировала заболевание вовсе. Для случаев без заболеваний 1359 - изображений были классифицированы успешно. И 226 - ошибочно. Для случаев с другими формами пневмоний 152 случая были классифицированы как - без болезни. Точность и полнота представлены в таблице 4.

Выводы

На основании данной работы и исследований осуществленных ранее, очевидно что результаты (точности моделей) достаточно высоки, несмотря не небольшое количество данных для тренировок и количество тренировочных итераций. Но важно отметить, что этого не достаточно для применения выработанных моделей на практике. Но данных результатов достаточно для продолжения исследования по заданной теме и есть вероятность что выработанные результаты, смогут побудить медицинское сообщество рассматривать CXR и CT изображения в сочетании с методами машинного обучения, как потенциальный метод диагностики COVID-19 до тех пор, пока более быстрые методы диагностики не станут широко распространенными. В дальнейшем развитии решения предполагается: обучение на существующем наборе данных с большим количеством тренировочных итераций; использование различных архитектур для обнаружения наиболее оптимальной для заданной задачи и достижения большей точности модели; увеличение набора данных; разработка мобильного приложения с использованием машинного зрения для идентификации COVID-19 в режиме реального времени с использованием камеры мобильного устройства. Исходники проекта доступны в open source [7].

Таблица 1. Статистика обучения стартовой модели

Итерация обучения	Прошедшее время	Точность модели
0	1.063014	0.708544
4	3.497627	0.873713
9	5.914812	0.922725

Таблица 2. Статистика обучения модели с измененной структурой данных

Итерация обучения	Прошедшее время	Точность модели
0	0.065913	0.777344
4	0.230118	0.777344
9	0.332947	0.882812
24	0.636141	0.992188

Таблица 3. Матрица ошибок (Confusion matrix)

True/Prediction	COVID-19	No Finding	others
COVID-19	135	2	62
No Finding	4	1359	222
others	31	152	4154

Таблица 4. Точность/Полнота финального построения модели (Precision/Recall)

Класс	Precision(%)	Recall(%)
COVID-19	79.41	67.84
No Finding	89.82	85.74
others	93.60	95.78

Список литературы

1. Joseph Paul Cohen. Инициатива подготовки набора данных для идентификации COVID-19. 2020. - URL: https://github.com/ieee8023/covid-chestxray-dataset
2. Набор данных от Kaggle - URL: https://data.mendeley.com/datasets/rscbjbr9sj/2
3. Radiopaedia (случаи для тренировки модели вне выборки данных) - URL: https://radiopaedia.org/playlists/25890?lang=gb
4. Chaolin Huang, Yeming Wang, Xingwang Li, Prof Lili Ren, Jianping Zhao. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. - 2020
5. . № 395 - URL: https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(20)30183-5/fulltextYicheng Fang, Huangqi Zhang, Jicheng Xie, Minjie Lin, Lingjun Ying,Peipei Pang, Wenbin Ji. Sensitivity of Chest CT for COVID-19: Comparison to RT-PCR. - URL: https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/radiol.2020200432

6. Tao Ai, Zhenlu Yang. Correlation of Chest CT and RT-PCR Testing in Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) in China: A Report of 1014 Cases - URL: https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/radiol.2020200642
7. Исходники проекта и документация - URL: https://github.com/cmuphobk/Covid.

METHOD FOR AUTOMATIC DETECTION CORONAVIRUS INFECTION COVID-19 USING NEURAL NETWORKS

post-graduate K.V. Smirnov, Dr. Sc. (Phys.-Math.) K.A. Vytovtov, E.A. Barabanova

ASTU
cmuphob.k@gmail.com

The purpose of this work is to describe the main problems associated with the identification of COVID-19. Try to repeat the conclusions of existing articles on the diagnosis of COVID-19 using the machine learning method. Make assumptions about optimizing existing identification solutions. Build a plan for the development of existing and developed solutions. Purpose of Solution: A potential solution based on CXR or CT and AI analysis can help healthcare providers more quickly identify COVID-19 and facilitate the correct use of resources.

Key words: Covid-19; Automatic Detections; X-Ray images; CT images; Convolutional Neural Networks; Deep Learning

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ КЛЕТОК И ВИРУСОВ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

студент Ванюшин М.В.[1], доцент, к.т.н. Носов П.А.[1], в.н.с. к.ф.-т.н. Зинин П.В.[2]

[1] МГТУ им. Н.Э. Баумана
[2] Научно-Технологический Центр Уникального Приборостроения Российской Академии Наук
pan@bmstu.ru, zosimpvz@mail.ru

В работе рассмотрено математическое моделирование вирусов и клеток различной геометрической конфигурации и свойств, проведен обзор существующих научных работ, посвященных данному вопросу и изучены базовые уравнения для создания математической модели сферической клетки с внутренней вязкой жидкостью.

Ключевые слова: частоты вибрации, моды колебаний, математическое моделирование, обзор работ, клетка, вирус

Введение

Большую часть научных знаний человечество получает из анализа окружающего макро- и микромира. Анализ подразумевает исследование взаимодействия с объектами: визуальное наблюдение, нагревание, охлаждение, облучение волнами различной частоты и т.д. В последнее время обширную область методов занимают облучение ультразвуком [1]. Благодаря этому способу анализа объектов можно получать информацию о форме, размере, составе и физических характеристиках тела, более того, возможно его разрушать, вводя в состояние резонансных колебаний. Кроме экспериментальных исследований на реальных объектах, также проводятся теоретические исследования, в которых важная часть принадлежит компьютерному моделированию физических процессов взаимодействия излучения с объектами. В таком случае возникает задача создания достаточно подробной модели с заданными воздействием и некоторыми характеристиками объекта, чтобы узнать другие параметры объекта. Модели разрабатываются в

зависимости от задач и известных параметров объекта, они могу отличаться даже для одного и того же тела.
В данной работе рассматриваются подходы к моделированию живой клетки и других соразмерных живых тел, таких как вирусы.

2. Математические модели биологических объектов

Проанализируем разработанные модели биологических объектов. В [2] изучается распространение волны внутри вирусоида и рассматриваются частоты вибрации частиц вирусов – вирусоидов. Для возбуждения колебаний вирусоиды подвергаются воздействию ультразвуком. Первая модель работы [2] – это жидкая невязкая капля размером около 50 нм, которая описывается через поверхностное натяжение и плотность. Для такой модели получено значение нижней границы частоты колебаний 100 МГц, а мода, свойственную этим колебаниям, является квадрупольной. Тем не менее, в этой работе отмечается, что для таких малых капель нельзя пренебрегать вязкостью жидкости, вследствие чего также рассматривается модель эластичной сферической частицы. Данная модель описывается через такие параметры, как радиус, скорость ударной и скорость поперечной волны. В [2] исследуются частоты колебаний для различных веществ, описываемых указанной моделью, и получено, что нижняя границы колебаний равна 1 ГГц, для которых характерна строго радиальная мода.
В работе [3] исследуются моды колебаний вируса табачной мозаики и бактериофага M13. Оба эти объекта имеют палочковидную форму, поэтому для них выбирают модель в виде цилиндра. Основными параметрами модели являются: продольная скорость звука, коэффициент Пуассона и плотность, а также геометрические размеры. В работе приводятся фононные спектры исследуемых вирусов и бактериофага в воде и воздухе.
В [4] рассматривается затухание звука в суспензиях и эмульсиях, изучается модель рассеяния звуковой волны на твердой сферической частице, находящейся в жидкости. В работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований воздействия звуком на решетку полистирола, эмульсии толуола и гексадекана, водную суспензию полистирольных сфер.
В работе [5] анализируются малоамплитудные осесимметричные деформации формы вязкоупругой жидкой капли в условиях микрогравитации. При этом авторы изменяют вязкую и упругую характеристики модели капли с целью выявления закономерностей. Важным условием окружающей среды является микрогравитация, поскольку жидкая капля при малых силах гравитации стремится к сферичности, что обосновывает выбор подобной формы в модели. В результате они показывают, что упругие эффекты вызывают колебания формы, не зависящие от поверхностного натяжения. Также на основании исследования авторы предлагают метод определения вязкоупругих свойств высоковязких жидкостей.

3. Моделирование воздействия ультразвука на клетку

В качестве демонстрации алгоритма моделирования биологического объекта авторы данной работы поставили своей задачей создать модель клетки, на которую воздействует звуковая волна. Представим саму клетку как жидкую среду в тонкой оболочке. Будем рассматривать клетку в воде, поэтому внешнюю среду также представим как жидкость. Жидкости внутри и снаружи клетки характеризуются плотностью ρ, скоростью звука в среде c, объемной вязкостью ξ и сдвиговой вязкостью η. Оболочка описывается с помощью постоянной натяжения T_0, модуля сжатия площади K_A, а также модулем μ, характеризующем сопротивление деформации сдвига. Условная схема модели показана на рис. 1.

Рис. 1. *Условная схема модели клетки.*

Целью моделирования является нахождение характерных частот колебания клетки, то есть решение дисперсионного уравнения. Для составления дисперсионного уравнения необходимо рассмотреть падение плоской волны на клетку. Поле скоростей в жидкости можно представить, как суперпозицию вихревого поля A и скалярного поля Ф:

$$V = -grad\Phi + rotA\,. \qquad (1)$$

Решения для Φ^I и Φ^O ищутся в виде расходящихся и стоячих сферических волн, для A^I как сдвиговая волна, для A^O как вязкая волна. Тогда можно получить волновые уравнения для указанных полей скоростей:

$$\left(\Delta + k^2\right)\Phi = 0,$$
$$\left(\Delta + \chi^2\right)A = 0, \qquad (2)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$, $\chi = \sqrt{\frac{i\omega\rho}{\eta}}$, ω – угловая частота падающей волны.

Введем сферическую систему координат r, θ, φ с началом координат в центре вируса. В силу симметрии будем рассматривать только колебания вдоль оси. Запишем вектор скорости V в новой системе:

$$V_r = -\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\Phi}{\partial r} - \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial(rA)}{\partial r},$$
$$V_\theta = -\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\Phi}{\partial r} - \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial(rA)}{\partial r}, \qquad (3)$$

где $V_\theta A = \frac{1}{\sin\theta}\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\left(A\sin\theta\right)$.

Дисперсионное уравнение выводится из системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которое можно получить из граничного условия тензоров напряжения:

$$\sigma_{TT}^O - \sigma_{TT}^I + \frac{T_O}{a^2}\left(2W_T + \Delta_\theta\frac{\partial W_T}{\partial\theta}\right) - \frac{2K_A}{a^2}\left(2W_T + \Delta_\theta W_\theta\right) = 0,$$
$$\sigma_{\theta T}^O - \sigma_{\theta T}^I + \frac{K_A}{a^2}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(2W_T + \Delta_\theta W_\theta\right) + \frac{\mu_a}{a^2}\left(2W_\theta + \frac{\partial}{\partial\theta}\Delta_\theta W_\theta\right) = 0, \qquad (4)$$

где $\Delta_\theta W = \frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta W_\theta\right), W$, – относительное движение оболочки, K_A – модуль сжатия площади, T_0 – постоянная напряжения, a – размер клетки (вируса), $\sigma_{\theta T}^O, \sigma_{TT}^O, \sigma_{\theta T}^I, \sigma_{TT}^I$ –компоненты тензора вязких напряжений, обусловленных воздействием наружной жидкости и внутренних изгибных напряжений.

А также равенства скоростей на оболочке:

$$V^I|_{T=a} = V^O|_{T=a} = \frac{\partial W}{\partial t}, \qquad (5)$$

где t – время.

Равенство (5) справедливо для любой пары скоростей.

С помощью указанных уравнений можно составить СЛАУ, определитель матрицы которой будет дисперсионным уравнением. Найдя корни уравнения, мы получим характерные частоты клетки, что и является целью исследования.

4. Заключение

В данной работе нами были рассмотрены несколько моделей биологических объектов различной структуры. Мы показали, что теоретические исследования сложны без создания математической модели, призванной упростить реальный объектов без потери при этом наиболее важных параметров и характеристик. Была описана математическая модель взаимодействия ультразвука с клеткой, представленной в виде жидкости в тонкой оболочке и помещенной в воду. Результатом использования данной модели должно стать получение значений характерных частот клетки.

Список литературы

1. Антушева Т. И. Некоторые особенности влияния ультразвука на микроорганизмы //Живые и биокосные системы. – 2013. – №. 4. – С. 11-11.
2. Ford L. H. Estimate of the vibrational frequencies of spherical virus particles //Physical Review E. – 2003. – Т. 67. – №. 5. – С. 051924.
3. Fonoberov V. A., Balandin A. A. Low-frequency vibrational modes of viruses used for nanoelectronic self-assemblies //physica status solidi (b). – 2004. – Т. 241. – №. 12. – С. R67-R69.
4. Allegra J. R., Hawley S. A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1972. – Т. 51. – №. 5B. – С. 1545-1564.
5. Khismatullin D. B., Nadim A. Shape oscillations of a viscoelastic drop //Physical Review E. – 2001. – Т. 63. – №. 6. – С. 061508

MODELLING THE ELASTIC PROPERTIES OF CELLS AND VIRUSES: STATE OF THE ART

student Vanyushin M.V.[1], assistant professor, PhD in Engineering sciences Nosov P. A.[1], leading researcher, PhD in Physico-mathematical sciences Zinin P. V. [2]

[1] Bauman Moscow State Technical University
[2] Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences
pan@bmstu.ru, zosimpvz@mail.ru

The paper considers the mathematical modelling of viruses and cells of various geometry and properties, reviews new works devoted to this issue, and studies the basic equations for creating a mathematical model of a spherical cell with the internal viscous fluid.

Key words: vibrational frequencies, vibrational modes, mathematical modelling, review of works, cells, viruses

МЕТОД МАКСИМАЛЬНОГО ПОДОБИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА БИОМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ В ПАРАДИГМЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ПРЕЦЕДЕНТАХ

в.н.с., к.ф.-м.н., доцент Анциперов В.Е.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
antciperov@cplire.ru

В докладе рассматривается новый метод решения задач распознавания, или более точно, идентификации объектов на биомедицинских изображениях по характеристикам формы их интенсивности. Предлагаемый метод в основном ориентирован на особенности КТ, ПЭТ, ОФЭКТ изображений, обусловленные слабой интенсивностью регистрируемых излучений и проявляющиеся в плохом разрешением, низкой контрастности и малом отношении сигнал/шум последних. Предлагаемый метод основан на принципах машинного обучения на прецедентах и предназначен для идентификации объектов, заданных наборами случайных точек (отсчетов) на слабо экспонированных изображениях. Проблема распознавания в рамках обсуждаемого подхода ставится как задача статистической классификации / идентификации объектов в отношении классов, сформированных по ранее наблюденным данным (прецедентам). Реализации предложенного подхода сводится к проблеме статистического обучения на основе формирования по наблюденным прецедентам их максимально-правдоподобных дескрипторов. Сам процесс идентификации подлежащих распознаванию объектов формулируется в рамках подхода как выбор для них дескрипторов максимально-подобных прецедентов.

Ключевые слова: машинное обучение по прецедентам, распознавание образов, идентификация объектов на изображениях, компьютерная томография (КТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ)

Медицинская визуализация представляет собой ряд техник и методов, предназначенных для реконструкции в виде биомедицинских (сегодня, как правило, цифровых) изображений различных органов и соответствующих им отделов, часто скрытых от непосредственного наблюдения. Актуальность визуализации обусловлена тем, что современная медицина использует ее во все большей степени как в процессах анализа клинических случаев, так и в диагностике. Сложилось несколько методов визуализация, таких, как

компьютерная (рентгеновская) томография (КТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) и т.д. [1].

Параллельное существование различных, перечисленных выше методов визуализации, связано, как правило, с чувствительностью каждого из них к определенному типу тканей. К примеру, МРТ-изображения чувствительны к мягким тканям, тогда как рентгеновские изображения более чувствительны к твердым и костным структурам. Однако несмотря на различие физических принципов, положенных в основу этих методов, их общей чертой является низкий уровень используемого рабочего излучения. Это ведет к тому, что для датчиков соответствующих систем визуализации характерен так называемый режим счета фотонов (Photon-counting detectors – PCDs) [2]. При этом, если для ПЭТ и ОФЭКТ этот режим является естественным, ввиду заложенных в их основу принципов, для КТ вплоть до недавнего времени в основном использовался режим накопления фотонов (energy-integrating detectors – EIDs). Так, традиционные EID системы формирования рентгеновских изображений требовали примерно ~ 10^3 фотонов на пиксель, чтобы гарантировать достаточное отношение сигнал / шум (SNR). Недавние разработки энергочувствительных PCD [3] открывают новые возможности для получения рентгеновских изображений при низком потоке фотонов (~ 10 фотонов на пиксель и, в перспективе, до 1:1).

Технология энергочувствительных PCD может кардинально изменить клиническую КТ, поскольку обеспечивает более высокое соотношении контрастности и шума, улучшает пространственное разрешение и открывает возможности спектральной (цветовой) визуализации. Кроме того, она позволяет уменьшить дозы облучения, устранить артефакты усиления луча, оптимизировать использование контрастных веществ. Вместе с тем, ввиду специфичности формируемых PCD изображений, традиционные методы, ориентированные на распознавание классических изображений [4], недостаточно эффективны для изображений рассматриваемого класса и, соответственно, остро ощущается потребность в новых подходах.

В данном докладе рассматривается один из подходов к решению задач распознавания или точнее идентификации объектов на PCD изображениях по характеристикам формы их интенсивности. Основная проблема, анализируемая в рамках предложенного подхода, связана с вопросами формирования по зарегистрированной совокупности дискретных фотоотсчетов (~ фотонов) заключений (выводов) относительно подобия формы интенсивности объекта на изображении форме ранее наблюдавшихся объектов (прецедентов). Для формального описания данных наблюдений от объекта – фотоотсчетов $\{\vec{x}_1,\ldots,\vec{x}_n\}$ используется n–модель распределения их совместных вероятностей в виде факторизованного произведения распределений отдельных отсчетов – так называемая модель наивного байесова подхода. Известно, что подобная модель хорошо описывает фотоотсчетные изображения, получаемых при регистрации слабых излучений [5]. В соответствии с принципами машинного обучения [6] рассматриваемая проблема формально ставится как задача статистической классификации / идентификации формы объекта по отношению к классам, сформированным по ранее наблюденным, связанными с прецедентами данным. При этом предполагается, что уже произведены наблюдения конечного числа форм интенсивности прецедентов и по каждой из них сформировано некоторое описание. Требуется по этому конечному множеству описаний определить к какому из имеющихся прецедентов следовало бы отнести форму интенсивности вновь зарегистрированного, заданного реализацией своих дискретных отсчетов объекта.

Метод максимального подобия

Предполагается, что в отношении некоторых объектов имеются наборы (случайных) наблюдений вида $X=\{\vec{x}_1,\ldots,\vec{x}_n\}$, где $\vec{x}_i\in\mathbb{R}^2$ (наблюдаемые, observed данные). Предполагается, что числа n наблюдений в наборах X могут быть произвольными. Процесс регистрации (наблюдения) не уточняются, в частности, не уточняется, интервал времени наблюдения (экспозиции) $\{\vec{x}_i\}$. Для представленного в работе *метода максимального подобия* существенна только их статистическая природа.

Со статистических же позиций предполагается, что каждое наблюдение $\vec{x}_i$ случайно и процесс его регистрации описывается некоторым параметрическим распределением вероятностей с плотностью $\rho\left(\vec{x}\middle|\vec{\theta}\right)$, $\vec{\theta}\in\Theta\subset\mathbb{R}^p$ (параметрической моделью). Предполагается, следуя байесовской точке зрения, что параметры $\vec{\theta}$ также являются случайными величинами, имеющими некоторое априорное распределение с плотностью $\wp\left(\vec{\theta}\right)$, точный вид которого, впрочем, не конкретизируется. Оба сделанных предположения позволяют ввести в рассмотрение плотность совместного распределения наблюдений $\vec{x}$ и параметров $\vec{\theta}-\rho\left(\vec{x};\vec{\theta}\right)=\rho\left(\vec{x}\middle|\vec{\theta}\right)\wp\left(\vec{\theta}\right)$.

Представленная параметрическая модель относится к классу так называемых порождающих моделей (generative model) [7], предполагающих соответствие наблюдаемых объектов и некоторых характеристических значений параметров $\vec{\theta}_1,\vec{\theta}_2,\ldots,\vec{\theta}_k,\ldots\in\Theta$ (в идентифицируемом (identifiable) случае их можно рассматривать как метки классов объектов [8]). Проблема, однако, в том, что точные значения этих параметров неизвестны, доступны только их оценки по наборам наблюденных данных $X_1,X_2,\ldots,X_k,\ldots$ от объектов.

В частности, в качестве таких оценок могут использоваться оценки максимального правдоподобия $\vec{\theta}_k^{(ML)}$ [9], определяемые из уравнений (максимального правдоподобия):

$$\vec{\theta}_k^{(ML)} = \arg\max_{\vec{\theta}\in\Theta} \varrho\left(X_k \middle| \vec{\theta}\right) \quad (1)$$

Как следует из (1), для формирования оценок максимального правдоподобия необходимо для каждого n, также, как и для n=1, задать свою параметрическую модель X – соответствующую плотность распределения вероятностей $\varrho\left(\vec{x}_1,\ldots,\vec{x}_n \middle| \vec{\theta}\right)$ (при естественном требовании согласованности этих моделей для разных n, см. теорему Колмогорова [10]). Однако можно существенно упростить эту задачу, приняв допущение об условной (при заданном $\vec{\theta}$) независимости отдельных наблюдений набора:

$$\varrho\left(X \middle| \vec{\theta}\right) = \prod_{i=1}^{n} p\left(\vec{x}_i \middle| \vec{\theta}\right) \quad (2)$$

Отметим, что допущение (2) активно используется в задачах машинного обучения, например, в рамках наивного байесова метода [11], входящего в десятку наиболее популярных современных алгоритмов [12]. Задача идентификации, соотнесения некоторого наблюдаемого объекта с одним из ранее зарегистрированных объектов (называемых в дальнейшем прецедентами) формализуется, таким образом, в контексте представленной параметрической модели как задача максимизации некоторой меры подобия наблюденных от объекта данных $X = \{\vec{x}_1,\ldots,\vec{x}_n\}$ с полученными ранее в отношении прецедентов наборами $X_1, X_2,\ldots,X_k,\ldots$. Поскольку никаких дополнительных знаний об объекте и прецедентах, кроме данных наблюдений $X, X_1, X_2,\ldots,X_k,\ldots$, не предполагается (в том числе о значениях характеристических параметров $\vec{\theta}_1,\vec{\theta}_2,\ldots,\vec{\theta}_k,\ldots\in\Theta$, характеристиках $\wp\left(\vec{\theta}\right)$ и т.д.), весьма желательно, чтобы соответствующая мера подобия $\mu\left(X, X_k\right)$ могла бы быть выражена в терминах этих и только этих данных.

Достаточно естественной количественной характеристикой согласованности данных X и произвольного набора наблюдений X_k является плотность вероятности их совместного распределения ис $p\left(X, X_k\right)$. С учетом основного допущения о рассматриваемых моделях (2) (а также предположения о независимости наборов X и X_k) плотность $p\left(X, X_k\right)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} p\left(X, X_k\right) &= \int p\left(X, X_k \middle| \vec{\theta}\right)\wp\left(\vec{\theta}\right)d\vec{\theta} = \int \varrho\left(X \middle| \vec{\theta}\right)\varrho\left(X_k \middle| \vec{\theta}\right)\wp\left(\vec{\theta}\right)d\vec{\theta} = \\ &\int \prod_{i=1}^{n}\rho\left(\vec{x}_i \middle| \vec{\theta}\right)\prod_{j=1}^{n_k}\rho\left(\vec{x}_j \middle| \vec{\theta}\right)\wp\left(\vec{\theta}\right)d\vec{\theta} = \int \varrho\left(X\cup X_k \middle| \vec{\theta}\right)\wp\left(\vec{\theta}\right)d\vec{\theta} \end{aligned}, \quad (3)$$

где $\{\vec{x}_j\}$ – набор X_k из n_k наблюдений, $X\cup X_k$ – полученный объединением X и X_k набор из $\left(n+n_k\right)$ наблюдений. Другими словами, $p\left(X, X_k\right)$ (3) является плотностью вероятности (2) объединенного набора наблюдений $\{\vec{x}_i\}\cup\{\vec{x}_j\}$.

С учетом приведенной интерпретации понятно, что $p\left(X, X_k\right)$ действительно в некотором смысле отражает степень согласованности X и X_k. Именно, если бы все $X_1, X_2,\ldots,X_k,\ldots$ были одного размера $n_1 = n_2 = \ldots = n$, то наборы $\{X\cup X_k\}$ представляли бы собой случайные $n+m$ –выборки в рамках одной параметрической модели $\varrho\left(X \middle| \vec{\theta}\right)$ (2). При этом степень согласованности $X \sim X_k$ определялась бы вероятностью совместной выборки $X\cup X_k$, т.е. $p\left(X, X_k\right)$ можно было бы рассматривать в качестве меры подобия. Проблема, однако, состоит в том, что в силу произвольности n_k наборы $\{\left(X\cup X_k\right)\}$ принадлежат разным моделям и, следовательно, сравнение значений $p\left(X, X_k\right)$ для разных X_k должно производиться с поправками на данное обстоятельство.

В предлагаемом *методе максимального подобия* соответствующие поправки задаются посредством нормировки значений $p\left(X, X_k\right)$ (3) на вероятности $p\left(X_k\right) = p\left(\varnothing, X_k\right)$ ($\varnothing$ – пустой набор, не содержащий ни одного наблюдения):

$$\mu\left(X, X_k\right) = \frac{p\left(X, X_k\right)}{p\left(X_k\right)} = p\left(X \mid X_k\right). \quad (4)$$

Другими словами, в методе максимального подобия в качестве меры $\mu\left(X, X_k\right)$ подобия наблюденных данных X и X_k предлагается использовать плотность условного распределения тестируемого набора наблюдений X при заданном наборе наблюдений X_k прецедента.

В контексте используемого байесова подхода, в терминах принятой параметрической модели (3) мера $\mu(X, X_k)$ (4) может быть переписана в виде:

$$\mu(X, X_k) = \frac{\int \varrho\left(X \middle| \vec{\theta}\right) \varrho\left(X_k \middle| \vec{\theta}\right) \wp\left(\vec{\theta}\right) d\vec{\theta}}{\int \varrho\left(X_k \middle| \vec{\theta}\right) \wp\left(\vec{\theta}\right) d\vec{\theta}}, \tag{5}$$

В случае $n_k \gg 1$ для можно воспользоваться асимптотикой $\varrho\left(X_k \middle| \vec{\theta}\right) = \varrho\left(X_k \middle| \vec{\theta}_k^{(ML)}\right) \times \exp\left[-\frac{n}{2}\left(\vec{\theta} - \vec{\theta}_k^{(ML)}\right)^* I\left(\vec{\theta}_k^{(ML)}\right)\left(\vec{\theta} - \vec{\theta}_k^{(ML)}\right)\right]$, где $\vec{\theta}_k^{(ML)}$ – оценка максимального правдоподобия (1) для набора наблюдений X_k, $I\left(\vec{\theta}_k^{(ML)}\right)$ –информационная матрица Фишера распределения $\rho\left(\vec{x} \middle| \vec{\theta}_k^{(ML)}\right)$. При этом числитель (5) имеет следующее приближение:

$$\begin{gathered} \int \varrho\left(X \middle| \vec{\theta}\right) \varrho\left(X_k \middle| \vec{\theta}\right) \wp\left(\vec{\theta}\right) d\vec{\theta} \approx \varrho\left(X \middle| \vec{\theta}_k^{(ML)}\right) \varrho\left(X_k \middle| \vec{\theta}_k^{(ML)}\right) \times \\ \int \exp\left[-\frac{n}{2}\left(\vec{\theta} - \vec{\theta}_k^{(ML)}\right)^* I\left(\vec{\theta}_k^{(ML)}\right)\left(\vec{\theta} - \vec{\theta}_k^{(ML)}\right)\right] \wp\left(\vec{\theta}\right) d\vec{\theta} \end{gathered}. \tag{6}$$

Если эту же асимптотику использовать также и для знаменателя (5), то выражение для меры подобия $\mu(X, X_k)$ (5) принимает следующую форму:

$$\mu(X, X_k) = \varrho\left(X \middle| \vec{\theta}_k^{(ML)}\right). \tag{7}$$

Другими словами, в случае больших наборов наблюдений прецедентов $X_1, X_2, \ldots, X_k, \ldots (n_k \gg 1)$ (набор n–наблюдений X идентифицируемого объекта не обязан быть большим) в качестве меры подобия $\mu(X, X_k)$ можно использовать значение плотности распределения наивного байесова метода (2) при значениях параметра $\vec{\theta} = \vec{\theta}_k^{(ML)}$.

Определив вид меры подобия наблюденных данных $\mu(X, X_k)$(4,7), собственно метод максимального подобия теперь можно формализовать как решение уравнения максимального подобия:

$$k_{MS} = \arg\max_k \mu(X, X_k) = \arg\max_k p(X, X_k), \tag{8}$$

т. е. как выбор прецедента k_{MS}, максимизирующего плотность условного распределения тестируемого набора наблюдений X при условии набора наблюдений X_k прецедента k.

В случае больших объемов наблюдений $X_k (n_k \gg 1)$ метод максимального подобия (8) согласно (7) принимает форму сходную с методом максимального правдоподобия (1):

$$k_{MS} = \arg\max_k \varrho\left(X \middle| \vec{\theta}_k^{(ML)}\right) = \arg\max_{\vec{\theta} \in \left\{\vec{\theta}_k^{(ML)}\right\}} \varrho\left(X \middle| \vec{\theta}\right), \tag{9}$$

с тем лишь исключением, что максимизация производится не по всем $\vec{\theta} \in \Theta$, а лишь по конечному набору оценок $\vec{\theta}_1^{(ML)}, \vec{\theta}_2^{(ML)}, \ldots, \vec{\theta}_k^{(ML)}, \ldots \in \Theta$. Отметим, что в этом случае нет необходимости хранить наборы наблюдений прецедентов $X_1, X_2, \ldots, X_k, \ldots$ в полном объеме, как они были зарегистрированы, достаточно сохранять лишь построенные по ним оценки параметров $\left\{\vec{\theta}_k^{(ML)}\right\}$.

Выводы

Показано, что формализация процесса регистрации PSD изображений от падающего на них слабого излучения n–моделью распределения совместных вероятностей отсчетов в виде модели наивного байесова подхода, являющейся наиболее адекватной с физической (квантовой) точки зрения, является исключительно плодотворной с точки зрения их статистического анализа. На этой основе, используя принципы машинного обучения нам удалось разработать эффективный подход синтеза процедур идентификации (распознавания) объектов, допускающий компьютерную реализацию в классе хорошо зарекомендовавшему себя семейств K-средних, EM-, вариационных и т.д. алгоритмов. Предполагается, что развитие предложенного метода максимального подобия для идентификации объектов на биомедицинских изображениях станет существенным вкладом в современные методы медицинской визуализации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант N 18-07-01295 А.

Список литературы

1. Черняев А.П., Волков Д.В., Лыкова Е.Н. Физические методы визуализации в медицинской диагностике. // М. ООП физ. фак. МГУ, 2019.
2. Leng S., et. al. Photon-counting Detector CT: System Design and Clinical Applications of an Emerging Technology. // RadiGraphics Vol. 39 (3). 2019, P. 729-743.
3. Willemink M.J., et. al. Photon-counting CT: Technical Principles and Clinical Prospects. // Radiology Vol. 289(2). 2018, P. 293-312.
4. Бернд Я. Цифровая обработка изображений // М. Техносфера, 2007.
5. Saleh B. Photoelectron Statistics. // Berlin . Springer Verlag, 1978
6. Antsiperov V. Object Identification on Low-Count Images by Means of Maximum-Likelihood Descriptors of Precedents. // Pattern Recognition and Image Analysis, Vol. 29 (1). 2019, P. 21–34.
7. Jebara T. Machine Learning: Discriminative and Generative. // Dordrecht. Kluwer, 2004.
8. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. // New York. Springer. 2004.
9. Efron B. Maximum likelihood and decision theory. // Ann. Statist., Vol. 10. 1982, P. 340–356.
10. Billingsley P. Probability and Measure, 2nd ed. // New York. Wiley, 1986.
11. Barber D. Bayesian Reasoning and Machine Learning. // Cambridge. Cambridge Univ. Press, 2012.
12. Wu X. et. al. Top 10 algorithms in data mining. // Knowl. Inf. Syst. Vol. 14 (1). 2007, P. 1–37.

MAXIMUM SIMILARITY METHOD FOR IDENTIFYING OBJECTS IN BIOMEDICAL IMAGES IN THE PARADIGM OF PRECEDENT BASED MACHINE LEARNING

lead. res., Ph.D., ass. prof. Antsiperov V.E.

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS
antciperov@cplire.ru

The report presents a new method of recognition, more precisely, identification of objects in biomedical images according to the shape of their intensity. The proposed method is focused on CT, PET, SPECT images that are caused by the low intensity of the registered radiation and manifested in poor resolution, low contrast, and small signal-to-noise ratio. The method proposed is based on the principles of machine learning on precedents paradigm and is intended to identify objects specified by sets of random points (counts) on weak exposed images. The problem of recognition within the framework of the discussed approach is posed as the problem of statistical classification / identification of objects in relation to classes formed from previously observed data (precedents). The implementation of the proposed approach is reduced to the problem of statistical learning based on the formation of maximally likelihood descriptors of the observed precedents. The process of identifying objects to be recognized is formulated within the framework of the approach as the choice of the most similar precedent descriptor.

Keywords: machine learning by precedents, pattern recognition, object identification in images, computed tomography (CT), positron emission tomography (PET), single-photon emission computed tomography (SPECT)

ОБРАБОТКА ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ, ИНСПИРИРОВАННЫХ ЗРИТЕЛЬНЫМ ВОСПРИЯТИЕМ ЧЕЛОВЕКА

в.н.с., к.ф.-м.н., доцент Анциперов В.Е., аспирант Кершнер В.А.

Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) им. В.А. Котельникова РАН
antciperov@cplire.ru, vladkershner@mail.ru

Среди особенностей восприятия графической информации человеческой сенсорной системой особый интерес представляет сенсорная адаптация. Это явление определяет изменение интенсивности ощущения при воздействии раздражителя определенного типа. Когда на органы зрительного восприятия начинают действовать раздражители малой интенсивности, человеческий глаз перестаёт воспринимать их воздействие

[1], к примеру, изображение предмета, изображенное в виде некоторой мозаики, через несколько секунд воспринимается как полноценное изображение без неровностей.
В работе особое внимание уделено исследованию особенностей зрительной системы человека, которые позволяют восстанавливать и опознавать образы на изображениях. Для этого была разработана математическая модель работы ганглиозных клеток ретины, которые являются приемниками импульсов крупных групп фоторецепторов [2,3]. Мы составляем картину интенсивности методом, основанным на измененном виде алгоритма максимизации ожидания, для чего из бинарного изображения объекта производится выборка случайных точек (отсчетов). В дальнейшем отсчеты объединяются в узлах условной сетки, имитирующих ганглиозные клетки, и к ним применяется разработанный нами алгоритм.
Цифровая обработка изображения алгоритмом, основанным на механизме человеческого восприятия, позволит оценить обрабатываемую клетками сетчатки глаза информацию, необходимую для восстановления испорченных изображений, и позволит быстрее и качественнее обрабатывать графическую информацию.

Ключевые слова: амплитудная модуляция, сенсорная система, опознание образов, ретина

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследованиях, грант № 18-07-01295 А.

Список литературы

1. А.К. Хараузов, П.П. Васильев, Ю.Е. Шелепин и др., Восприятие изображений в задачах зрительного поиска в условиях динамической помехи, Оптический журнал. 2015. - Т. 82, № 5. - с. 42-55.
2. А.Н. Гусев, Общая психология. Т.2: Ощущение и восприятие. Издательский центр «Академия». 2007, - 416 с.
3. Ю.И. Александров, Психофизиология: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2014 – 464 с.

PROCESSING OF GRAPHIC INFORMATION BASED ON RECOGNITION ALGORITHMS INSPIRED BY HUMAN VISUAL PERCEPTION

leading researcher, Ph.D., associate professor Antsiperov V.E., postgraduate Kershner V.A.

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS
antciperov@cplire.ru, vladislav.kershner@mail.ru

Among the features of the perception of graphic information by the human sensory system sensory adaptation is of particular interest. This phenomenon determines the change in the intensity of sensation when exposed to a stimulus of a certain type. When stimuli of low intensity begin to act on the organs of visual perception, the human eye ceases to perceive their influence [1], for example, an image of an object depicted in the form of a mosaic is perceived after a few seconds as a full-fledged image without irregularities.
In our work, special attention is paid to the study of the features of the human visual system which make it possible to reconstruct and recognize objects in images. For this, a mathematical model of retina ganglion cells work was developed. These cells are receivers of impulses from large groups of photoreceptors [2,3]. We draw up a picture of intensity using a method based on a modified form of the expectation maximization algorithm, for which a sample of random points (samples) is made from a binary image of an object. Subsequently, the readings are combined at the nodes of a conditional grid that simulate ganglion cells, and the algorithm we have developed is applied to them. Digital image processing by an algorithm based on the human perception mechanism will allow evaluating the information processed by the cells of the retina, which is necessary to restore damaged images, and will allow faster and better processing of graphic information.

Keywords: amplitude modulation, sensory system, pattern recognition, retina

РАННЯЯ ДИАГНОСТИКА АТЕРОСКЛЕРОЗА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

к.ф.-м.н., доцент, в.н.с. Анциперов В.Е.[1,2],
к.ф.-м.н., с.н.с. Данилычев М.В.[1,2], м.н.с. Мансуров Г.К.[1]

[1]Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН
[2]Российский новый университет
antciperov@cplire.ru, dan496@yandex.ru, gkmansurov@gmail.com

В приведенном докладе рассматривается возможность неинвазивного измерения скорости распространения пульсовой волны (СРПВ) артериального давления с помощью разработанного авторами пневматического датчика со встроенным каналом ЭКГ. Знание величины этого параметра, наряду с непрерывным мониторингом артериального давления (АД) и анализом динамики пульсовой волны позволяет отслеживать текущее состояние сердечнососудистой системы, и проводить, в том числе, диагностику клинических и субклинических проявлений атеросклероза.

Ключевые слова: артериальное давление, пульсовая волна, пневматический датчик, неинвазивные методы измерения, гемодинамика, ЭКГ, атеросклероз, доклиническая диагностика

Важнейшим моментом в лечении атеросклероза является его профилактика и ранняя диагностика. В субклинической (до появления ясных клинических признаков) стадии атеросклероз представляет собой процесс постепенной, внешне малозаметной, утраты кровеносными сосудами своих основных функций. Часто это выглядит для пациента, как естественная возрастная деградация сосудов на протяжении многих лет. Стенки сосудов постепенно обызвествляются и теряют свою эластичность, прогрессирует сужение диаметра сосуда. Процесс характеризуется повышением жесткости артериальных стенок и увеличением артериального давления (АД). Для ранней диагностики атеросклероза в его субклинической фазе весьма значительный интерес представляют различные неинвазивные методы исследований. В большинстве своем это методы связанные со структурной и функциональной оценкой состояния кровеносных сосудов. Например, ангиодинография сонной артерии, т.е. ультразвуковое допплеровское исследование, для оценивания толщины комплекса интима-медиа и характеристик бляшек, а также метод оценки лодыжечно-плечевого индекса для выявления бессимптомного заболевания периферических артерий. Вместе с тем, особый интерес вызывают методы, основанные на неинвазивном измерении систолического артериального давления и, вообще, на анализе общей динамики пульсового артериального давления, т.к. эти показатели комплексным образом характеризуют состояние сердечно-сосудистой системы. Установлено, что параметры АД коррелируют с параметрами жесткости и старения сосудов. При этом увеличение жесткости сосудов приводит к повышению систолического АД ввиду неполного перехода кинетической энергии потока крови из левого желудочка сердца в потенциальную энергию растягивающейся стенки аорты. Поэтому наблюдаемое повышение систолического АД служит естественным индикатором увеличения артериальной жесткости и, как следствие, вероятности развития атеросклероза. Однако на практике более популярным количественным методом оценки артериальной жесткости стало измерение скорости распространения пульсовой волны (СРПВ), т.е. – скорости распространяющейся по артериям волны повышенного давления, вызванной выбросом крови из левого желудочка сердца в период систолы. По понятным причинам, естественным методом измерения СРПВ признано непосредственное измерение величины запаздывания волны (PWTT – pulse wave transit time) между парой заданных поперечных сечений исследуемой артерии. Для этого обычно используется пара сфигмометрических датчиков, расположенных проксимально над поверхностными сосудами (артериями) и дистально по отношению к сердцу (на сонной, бедренной, лучевой, и других доступных артериях). Если знать расстояние d между датчиками и определить время запаздывания волны между ними как $\Delta t = t_2 - t_1$, то величину СРПВ можно, очевидным образом, представить в виде отношения этих величин:

$$\upsilon = d / \Delta t = d / \left(t_2 - t_1\right), \tag{1}$$

где t_2 и t_1 – моменты времени последовательного прохождения некоторого выбранного маркера пульсовой волны, например, ее фронта для каждого из датчиков.

В 2006 году между различными группами исследователей был достигнут и оформлен в виде согласительного документа [1] консенсус по методологическим вопросам и клиническим применениям оценки артериальной жесткости. В этом документе рекомендовалось измерение СРПВ в качестве простого, но достоверного метода диагностики состояния сосудов. За прошедшее время было опубликовано, в том числе российскими учеными [2-8], большое число результатов исследований по определению жесткости артерий. Была подтверждена, наряду с общепринятыми способами оценками сердечнососудистого риска, и

важность определения сосудистой жесткости как независимого и значимого прогностического показателя [2]. Отметим, что многие исследователи [2] считают технологию оценивания эластических свойств артерий на основе измерений СРПВ своего рода “золотым стандартом” клинической диагностики.

В предшествующие годы авторами доклада разрабатывалась и экспериментально тестировалась целая линейка датчиков нового типа для регистрации динамики пульсовой волны артериального давления, и в том числе, трехканальный пневматический датчик непрерывного неинвазивного мониторинга артериального давления [3-6]. Данный датчик был протестирован в многочисленных экспериментах, включая его верификацию по отношению к традиционным тонометрам (сфигмоманометрам). Результаты оказались вполне адекватными [6]. В частности, при правильном позиционировании максимумы и минимумы измеряемой пульсовой волны вполне соответствовали систолическому и диастолическому давлениям, измеренным как с помощью механического (AND UA-100), так и электронного (Omron R2) тонометров. Очевидным преимуществом разработанного прибора является непрерывный режим измерения динамики АД, который позволяет не только определять текущие систолическое/диастолическое давления, но и отслеживать динамику АД, как внутри цикла, так и на значительных интервалах времени. Вместе с тем, эксперименты показали, что использование пневматических датчиков для прямого метода оценивания СРПВ является непростой, требующей от оператора наработанных навыков, процедурой. Основной причиной этого является отмеченная ранее проблема позиционирования пневматических датчиков [5,6] над исследуемой артерией. Процедура позиционирования измерительного элемента оказывается адаптивной к регистрируемому сигналу, что ведет к достаточно сложным сценариям измерения АД. Если же измерительных элементов два и они расположены в разных местах над артерией (см. формулу 1), то проведение синхронных измерений при одновременном контроле положения обоих датчиков превращается в трудновыполнимую задачу (сопровождающуюся к тому же резким снижением устойчивости измерений по каждому из каналов). Решение проблемы оценивания СРПВ с помощью пневматических датчиков было осуществлено на основе другого – непрямого метода. Идея здесь состоит в том, что если разнести измерения для пары точек над артерией еще и по времени, то можно обойтись только одним датчиком. Эта идея может быть осуществлена на основе следующих соображений. Предположим, что запаздывание пульсовой волны измеряется не между выбранными точками на артерии, а в каждой из этих точек по отношению к некоторому третьему событию, например, по отношению к моменту времени t_R сокращения желудочков сердца (к положению R–зубца на ЭКГ). Тогда, обозначая посредством δ_1 и δ_2 соответствующие запаздывания, очевидно, можно записать $t_1 = t_R + \delta_1$ и $t_2 = t_R + \delta_2$. Отсюда следует, что время запаздывания пульсовой волны между выбранными точками есть $\Delta t = t_2 - t_1 = \delta_2 - \delta_1$. Теперь, если предположить, что запаздывания δ_1 и δ_2 определяются только геометрическими и физическими параметрами соответствующей артерии и не зависят от “привязки” к конкретному циклу, то δ_1 и δ_2 можно измерять по отношению к разнесенным по времени сердечным циклам одного физиологического состояния. Для чего, собственно, можно использовать один и тот измерительный элемент (датчик).

Для исследования возможности реализации описанного выше непрямого метода оценивания СРПВ в разработанный авторами пневматический датчик АД [3-6] был интегрирован дополнительный канал синхронного измерения электрокардиографического (ЭКГ) сигнала (см. рис.1). В данном случае этот канал, говоря языком радиотехники, выступает в качестве своеобразного перестраиваемого гетеродина или тактового генератора.

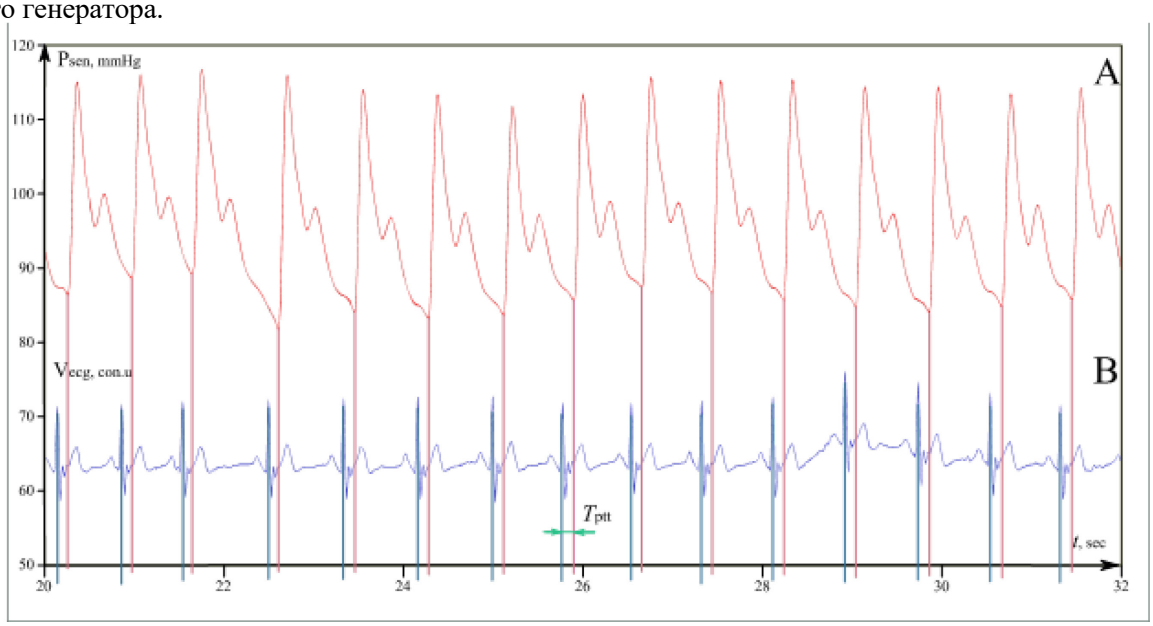


Рис. 1. *Синхронные измерения сигналов АД (А) и ЭКГ(В). Вертикальными линиями отмечены моменты R–зубцов кардиограммы и соответствующие им минимумы (подножия – PV foots) пульсовой волны АД.*

Поскольку цель подобной модификации заключалась только в синхронизации временных параметров пульсовой волны АД с ритмической активностью сердца, то измерительное устройство ЭКГ было реализовано в виде упрощённого одноканального усилителя на основе оригинальной схемы отведения сухих (без токопроводящего геля) электродов, что позволило обойтись в этой схеме без нейтрального электрода. На рис.1 показан фрагмент 12-и секундной синхронной динамики измеренных модифицированным пневматическим датчиком сигналов артериального давления $P_{sen}(t)$ на запястье пациента и ЭКГ сигнала $V_{ecg}(t)$ на отведении от кистей обеих рук. На обоих сигналах временными маркерами (вертикальными линиями) отмечены положения во времени R–зубцов ЭКГ и подножий (PV foots) пульсовой волны АД, обычно интерпретируемых как начала соответствующих комплексов. Ниже, в таблице 1 приведена количественная информация об изменчивости R–R и foot–foot интервалов и времен запаздывания R-f пульсовой волны (T_{ppt}) в виде соответствующих средних значений и стандартных отклонений – для группы испытуемых из 12 добровольцев. Данные получены при измерениях в одной из точек лучевой артерии – на запястье (фрагмент данных добровольца N1 представлен на рис.1). Из графика и данных таблицы видно, что при достаточно выраженной изменчивости (вариабельности) как R–R интервалов ЭКГ, так и f–f интервалов ПВАД, времена запаздывания R-f пульсовой волны по отношению к R–зубцам, т.е. $T_{ppt} = T_f - T_R$, остаются гораздо более стабильными для каждого испытуемого.

Таблица 1. Усредненные временные параметры синхронно измеренных сигналов артериального давления на запястье и ЭКГ на отведении от кистей.

N п/п	Возр.	Сост.	Число усред.	Средн. R–R (с)	Стд.отк. R–R (с)	Средн. f–f (с)	Стд.отк. f–f (с)	Средн. R–f (с)	Стд.отк. R-f (с)
1	60	инф.	35	0.8591	0.0077	0.8599	0.0101	0.1109	0.0038
2	25	здор.	34	0.9279	0.0357	0.9252	0.0343	0.1425	0.0039
3	27	здор.	43	1.0320	0.0236	1.0325	0.0240	0.1345	0.0023
4	50	здор.	50	0.9858	0.0384	0.9850	0.0407	0.1151	0.0045
5	62	тахик.	48	0.8119	0.0065	0.8117	0.0061	0.1100	0.0020
6	56	гипер.	84	0.8575	0.0168	0.8572	0.0148	0.1103	0.0039
7	57	здор.	52	0.8222	0.0114	0.8215	0.0148	0.1174	0.0065
8	22	аритм.	22	1.0595	0.0435	1.0569	0.0434	0.1558	0.0026
9	22	аритм.	23	1.0506	0.0799	1.0532	0.0460	0.1374	0.0037
10	30	здор.	27	0.7250	0.0236	0.7259	0.0252	0.1311	0.0048
11	80	инф.	16	0.8648	0.0110	0.8633	0.0152	0.1100	0.0073
12	61	здор.	22	0.9125	0.0179	0.9067	0.0205	0.1060	0.0060

Попытка аналогичного измерения тем же датчиком и в той же конфигурации над подключичной артерией неожиданно оказалась практически нереализуемым делом. Стало ясно, что на тот момент простого решения не существует. Вместе с тем было также понятно, что для получения корректной оценки состояния сосудов и степени развития атеросклероза крайне желательно получать такие данные на “достаточно длинном” участке артерии, а не ограничиваться измерениями только “на руке”. В качестве первичной оценки было предложено рассмотреть возможность оценивания СРПВ с помощью всего лишь одного пневматического датчика, позиционируемого только в одной точке. Суть предложения состояла в том, чтобы в качестве одной из рабочих позиций принять (вообразить) “виртуальную” позицию вблизи аортального клапана, а в качестве второй (реальной) позиции использовать то месторасположение датчика, где измерение АД осуществить с необходимой точностью легче всего, например, над лучевой артерией (см. рис.1,2). Отметим, что сама эта идея не является принципиально новой – существует признанная методология измерения СРПВ с помощью, совмещенного с ЭКГ плетизмографического датчика, установленного, например, на пальце руки пациента [10]. Однако, при всей внешней похожести нашего метода на известные “плетизмографические” подходы, имеется и существенное, принципиальное различие в способе расчета оценки СРПВ по данным ЭКГ и датчика АД – различие в оценке времени запаздывания пульсовой волны $T_{ppt} = T_f - T_R$ (см. рис.2). Цитируемые исследователи [10] вслед за своими коллегами исходили из предположения, что момент появления R–зубца на ЭКГ практически совпадает с моментом начала формирования (подножия) пульсовой волны на выходе аорты/в начале подключичной артерии (subclavian artery). При этом в качестве времени распространения волны T_{pwtt} можно взять суммарное время запаздывания T_{ppt} и, поделив d – расстояние от яремной впадины (jugular notch) до кончика пальца руки на него, получить оценку СРПВ в виде $V = d / T_{ptt}$. И, хотя, в работе все-таки отмечается, что T_{pwtt} отличается от T_{ppt} на величину периода предызгнания (pre-ejection period) T_{pep} – времени

между сокращением желудочков сердца и началом формирования пульсовой волны на выходе аорты, авторы исследования [10] посчитали, что этой разницей вполне можно пренебречь предположив справедливость $T_{pep} \ll T_{ptt}$.

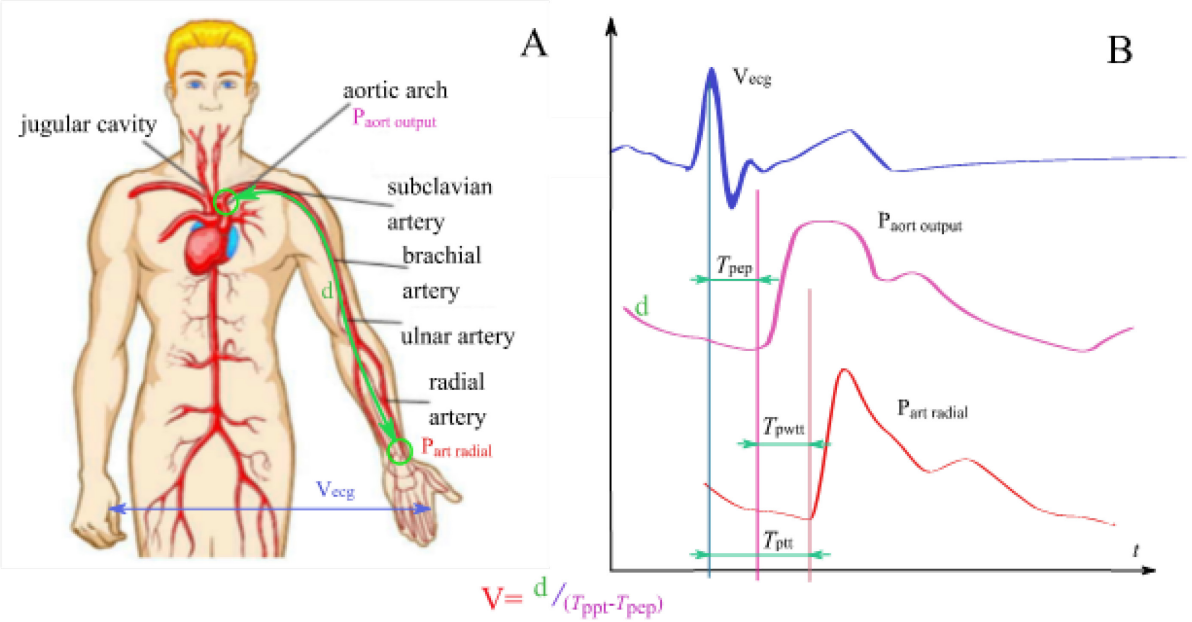


***Рис. 2**. Схема оценивания СРПВ. А – "виртуальная" позиция – над дугой аорты в районе яремной впадины и реальная позиции датчика на запястье – над лучевой артерией.*
В – условное изображение сигналов ЭКГ $V_{ecg}(t)$ и волн АД $P_{aortoutput}(t)$ и $P_{artradial}(t)$ в позициях схемы А и соотношения между периодом предызгнания, временем распространения волны АД вдоль артерии и временем запаздывания.

Однако, как показали наши исследования, в случае, когда датчик АД установлен на запястье или выше по руке, предположение $T_{pep} \ll T_{ptt}$ становится весьма спорным, если вообще не перестает быть допустимым. В недавнем исследовании других авторов [11], например, приведены, основанные на эхокардиографических измерениях, значения T_{pep} в трех группах по 20 добровольцев. Это - А) контрольная группа без сердечно-сосудистых заболеваний в возрасте <50 лет, В) в возрасте> 50 лет и С) группа с сердечно-сосудистыми факторами риска, определяемыми как артериальная гипертензия, дислипидемия, почечная недостаточность и сахарный диабет. В сжатом виде полученные в [11] результаты можно резюмировать следующим образом: T_{pep} для групп А и В лежит соответственно в пределах 58,5 ± 13,0 мсек и 52,4 ± 11,9 мсек, а для группы С - в пределах 57,6 ± 11,6 мсек. Сравнивая эти результаты с полученными нами данными, например, представленными в таблицах 1 и 2, где T_{ptt} для аналогичных групп составляет А) 140,5 ± 10,1 мсек, В) 112,1 ± 4,8 мсек и С) 110,4 ± 5,0 мсек, несложно подсчитать, что T_{pep} составляет весьма значительную долю от T_{ptt} – до половины его значения. Из изложенного выше следует, что для оценки величины СРПВ должна использоваться более корректная формула:

$$V = d / \left(T_{ptt} - T_{pep}\right) \qquad (2)$$

в которой нельзя пренебрегать периодом предизгнания T_{pep}. Однако можно попроюовать обойтись без необходимости определения T_{pep} в каждом конкретном случае. В процитированной выше работе [11] отмечается, что параметр T_{pep} имеет достаточно слабые индивидуальные вариации, по крайней мере, внутри определенных групп обследуемых. Поэтому, имея эти референсные значения T_{pep} для соответствующих групп, и, выяснив принадлежность пациента к определенной группе, можно на основе предложенного метода оценивать СРПВ только по описанному выше измерению времени запаздывания T_{ptt}, но с обязательной корректировкой его на T_{pep}. Результаты соответствующего вычисления СРПВ для данных таблицы 1 приведены ниже в таблице 2.

Результаты оценки СРПВ (табл.2) получены на основе вышеизложенной технологии непрямого оценивания. Несмотря на допущенные при расчетах очевидные упрощения эти результаты соответствуют известным из литературы [7-9] реперным значениям, которые получены с помощью иных методов измерения. В частности, они достаточно адекватно отражают возрастные тенденции (рис.3) и корреляцию СРПВ с проблемными случаями.

Таблица 2. Оценки СРПВ на основе синхронно измеренных сигналов артериального давления на запястье и ЭКГ на отведении от кистей.

N п/п	Возр.	Сост.	Число усред.	Средн. T_{ptt} (с)	Рефер. $T_{рер}$ (с)	Расст. d (м)	СРПВ V (м/с)
1	60	инф.	35	0.1109	0.0576	0.70	13.1
2	25	здор.	34	0.1425	0.0585	0.68	8.1
3	27	здор.	43	0.1345	0.0585	0.66	8.7
4	50	здор.	50	0.1151	0.0524	0.65	10.4
5	62	тахик.	48	0.1100	0.0524	0.68	11.8
6	56	гипер.	84	0.1103	0.0576	0.67	12.7
7	57	здор.	52	0.1174	0.0524	0.68	10.5
8	22	аритм.	22	0.1558	0.0585	0.66	6.8
9	22	аритм.	23	0.1374	0.0585	0.66	8.6
10	30	здор.	27	0.1311	0.0585	0.68	9.4
11	80	инф.	16	0.1100	0.0576	0.66	12.6
12	61	здор.	22	0.1060	0.0524	0.64	11.9

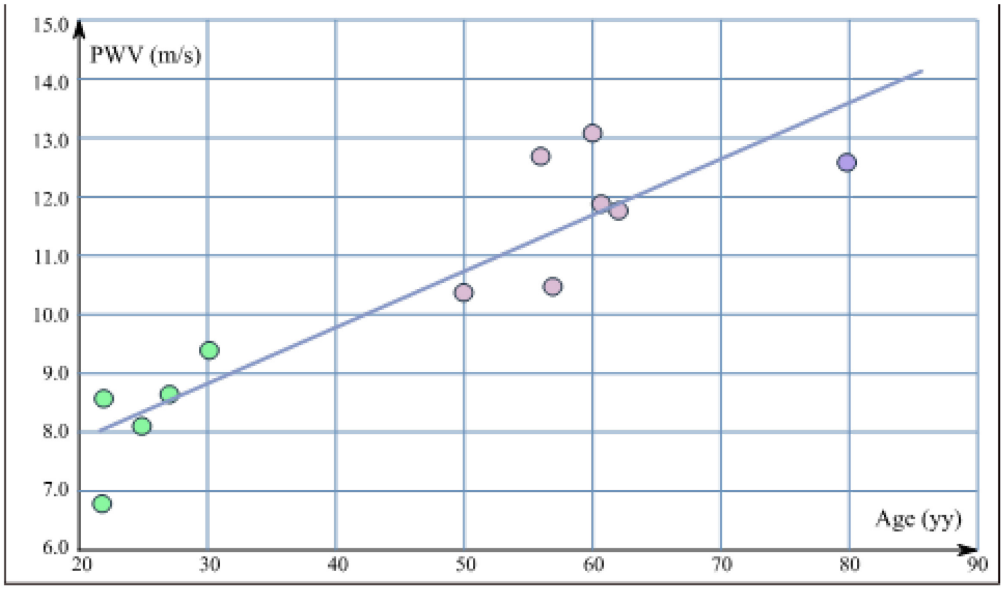


Рис.3. *Зависимость измеренных величин СРПВ (PWV, м/с) от возраста добровольцев (Age, лет) согласно полученным экспериментальным данным (табл.1 и 2).*

Оценивание СРПВ по предложенной методике можно проводить в ходе стандартного мониторинга артериального давления пневматическим датчиком с интегрированным каналом ЭКГ [3-6]. Таким образом, спектр применения ранее разработанной аппаратуры расширяется функцией предварительной диагностики состояния сердечнососудистой системы на предмет выявления риска ряда заболеваний, включая диагностику атеросклероза на ранних стадиях развития. Вместе с тем, вопрос использования в данной методике полученных в работе [11] референсных значений времени предизгнания как эталонных остается достаточно спорным. Мы вправе все-таки предполагать влияние на эти величины самых разнообразных факторов, например, возраста, пола, наличия инфекционных или иных некардиологических заболеваний и т.п. Поэтому параллельно с развитием данной методики авторы и их коллеги прилагали значительные усилия по модернизации измерительного датчика с целью обеспечить возможность прямого измерения в районе подключичной артерии. В результате был разработан новый вариант конфигурации прибора, и получены первые экспериментальные данные. Для испытуемого N12 (см. табл.1,2) средние значения по 15 измерениям на лучезапястной позиции составили: 0,8237 ± 0,0018с для R–R интервалов ЭКГ, 0,8234 ± 0,0017с для f–f интервалов и 0,1003 ± 0,0001с для R–f интервалов. Для подключичной позиции (после небольшой физической нагрузки): 0,7495 ± 0,0006с для R–R интервалов ЭКГ, 0,7495 ± 0,0004с для f–f и 0,0348 ± 0,0001с для R–f интервалов. Т.о. величина СРПВ для данного испытуемого (между выбранными позициями) составляет около 9.78 м/с. Это приблизительно на 20% расходится с данными измерения по упрощенному методу (см. таблица 2). Кроме этого очевидно, что данные

по подключичной артерии не позволяют “всунуть” в них референсные значения из работы [11]. В дальнейшем представляется необходимым выполнение значительного объема уточняющих исследований.

Работа выполнена в рамках Госзадания и при финансовой поддержке РФФИ, грант 18-29-02108.

Список литературы

1. Laurent S, Cockcroft J, Van Bortel L, et al. Expert consensus document on arterial stiffness: methodological issues and clinical applications. // Eur Heart J. 2006; 27:2588-605. DOI: http://dx.doi.org/10.1093/eurheartj/ehl254.
2. Васюк Ю.А., Иванова С. В., Школьник Е. Л. и др. Согласованное мнение российских экспертов по оценке артериальной жесткости в клинической практике. //Кардиоваскулярная терапия и профилактика, 2016; 15(2): 4–19. DOI: http://doi.org/10.15829/1728-8800-2016-2-4-19.
3. Анциперов В.Е., Мансуров Г.К. и др. Патент на изобретение 2638712 «Пневматический сенсор для непрерывного неинвазивного измерения артериального давления», приоритет от 07.11.2016 г., опубликовано 15.12.2017, Бюллетень. № 35.
4. Анциперов В.Е., Мансуров Г.К. и др. Патент на изобретение 2675066 «Монолитный трёхкамерный пневматический сенсор с встроенными дроссельными каналами для непрерывного неинвазивного измерения артериального давления», приоритет от 26.92.2018 г., опубликовано 14.12.2018, Бюллетень. № 35.
5. Antsiperov V., Mansurov G. Positioning Method for Arterial Blood Pressure Monitoring Wearable Sensor. // Bioinformatics and Biomedical Engineering. IWBBIO 2019, Rojas I., et al (eds). Lecture Notes in Computer Science, vol. 11465. Springer, Cham, 2019, pp 405-414. DOI: 10.1007/978-3-030-17938-0_36.
6. Мансуров Г.К., Данилычев М.В., Анциперов В.Е., Бугаев А.С. Использование пневматического датчика в задаче непрерывного неинвазивного мониторинга артериального давления и пульсовой волны //Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №5. Режим доступа: http://jre.cplire.ru/jre/may20/9/text.pdf. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.5.9.
7. Benetos A., Labat C., Lacolley P. Determinants of pulse wave velocity in healthy people and in the presence of cardiovascular risk factors: ‘Establishing normal and reference values.’ // Eur Heart J, vol. 31, 2010, pp 2338–2350. DOI: 10.1093/eurheartj/ehq165.
8. Kim H-L, Kim S-H. Pulse Wave Velocity in Atherosclerosis. // Front Cardiovasc Med., vol. 6, art. 41, 2019. DOI: 10.3389/fcvm.2019.00041; PMID: 31024934.
9. Cavalcante J.L., Lima J.A., Redheuil A, Al-Mallah M.H. Aortic stiffness: current understanding and future directions. // J Am Coll Cardiol. vol. 57, N 14, 2011, pp. 1511–22. DOI: 10.1016/j.jacc.2010.12.017.
10. Bereksi-Reguig M.A., Bereksi-Reguig F., Ali A.N. A New System for Measurement of the Pulse Transit Time, the Pulse Wave Velocity and Its Analysis. // J. Mech. Med. Biol., vol. 17, N 1, 2017, p. 1750010. DOI: 10.1142/S0219519417500105.
11. Kortekaas M.C., et al. Small intra-individual variability of the pre-ejection period justifies the use of pulse transit time as approximation of the vascular transit. // PLoS ONE vol. 13, N 10, 2018, p. e0204105. DOI: 10.1371/journal.pone.0204105.

EARLY DIAGNOSIS OF ATHEROSCLEROSIS BASED ON THE ASSESSMENT OF THE PULSE WAVE PROPAGATION RATE OF BLOOD PRESSURE

Antsiperov V.E., Danilychev M.V., Mansurov G.K.

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS
antciperov@cplire.ru, dan496@yandex.ru, gmansurov@mail.ru

The paper discusses the possibility of non-invasive measurement of the propagation velocity of the pulse wave of blood pressure using a new type of pneumatic sensor with an integrated ECG channel. Knowledge of the value of this parameter, along with non-invasive continuous monitoring of the blood pressure (BP) and analysis of the dynamics of the pulse wave, permits to control the current state of the cardiovascular system, and to carry out, including diagnosis of clinical and subclinical manifestations of atherosclerosis.

Keywords: blood pressure, pulse wave, pneumatic sensor, non-invasive measurement methods, hemodynamics, ECG, atherosclerosis, subclinical diagnosis

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Авторский указатель

Аквилонова А.Б. 38
Алфимцев А.Н. 73
Анциперов В.Е. 111, 115, 117
Ахияров В.В. 17
Балабанов Д.Е. 49
Балабуха Н.П. 20, 23
Баландин И.А. 62
Барабанова Е.А. 105
Батшев В.И. 62
Белов А.А. 12
Бессонов В.Б. 74
Богаченков А.Н. 94
Боголюбов А.Н. 8, 12
Боритко С.В. 49, 71
Будунова К.А. 32
Булатов К.М. 52
Булатов М.Ф. 90
Бурлаков А.Б. 94
Ванюшин М.В. 108
Виноградов М.А. 66
Вытовтов К.А. 105
Габова А.В. 100
Гавлина А.Е. 62
Горбунов Ю.Н. 25
Горевой А.В. 56
Данилычев М.В. 38
Данилычев М.В. 117
Домбровская Ж.О. 12
Евстафьев Е.Е. 20
Жбанников С.О. 12
Зинин П.В. 52, 94, 108
Карандин А.В. 71
Карабанов А.В. 100
Качурин Ю.Ю. 64
Кершнер В.А. 115
Кершнер И.А. 103
Кирьянов А.Ю. 81
Кирюхин И.С. 90
Клонов В.В. 74
Кузьмич Т.А. 23
Кутуза Б.Г. 38
Ларионов И.А. 74
Львович И.Я. 35
Малыхин А.Ю. 78
Мансуров Г.К. 117
Мачихин А.С. 56
Меньших Н.Л. 23
Милякова Е.С. 35
Могилевский И.Е. 8, 10
Морозов А.А. 100, 103
Нагаенко А.В. 78
Никитин П.А. 85, 87
Новиков Д.А. 62
Носов П.А. 52, 66, 108
Павлов И.В. 14
Петров Н.И. 29, 46, 59
Петрова Г.Н. 29
Пожар В.Э. 56
Преображенский А.П. 35
Пустовойт В.И. 46
Разгуляев С.В. 14
Ровенко В.В. 8
Сакулин С.А. 73
Силаев С.А. 25
Смирнов К.В. 105
Смирнов М.Т. 38
Староверов Н.Е. 74
Сушкова О.С. 100, 103
Титов С.А. 94
Федоринов А.С. 64
Фирсов А.В. 35
Хохлов Д.Д. 56
Храмов Н.А. 52
Христофорова Ю.А. 97
Чигалейчик Л.А. 100
Чопоров О.Н. 35
Чуриков Д.В. 90
Шапкина Н.Е. 20, 23
Шацкая А.А. 97
Шушарин М.М. 10
Ялынич С.А. 78

Научное издание

Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации

Материалы 13-й Международной научно-технической конференции
ARMIMP-2020
Москва, 12 – 13 октября 2020 г.

http://armimp.ru

Отпечатано в типографии «DC Print», г. Москва,
3-й Нижнелихоборский проезд, д. 1А, стр. 3, оф. 3
16.11.2020, тираж 100 экз.

Информационная поддержка:
Журнал “Физические основы приборостроения”

ISSN: 2225-4293 **http://jfop.ru**
Online ISSN: 2712-7885

Подписка на журнал оформляется
через подписное агентство «Книга-Сервис»
и объединенный каталог «Пресса России»
(подписной индекс 29196)

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ

Научно-технологический центр
уникального приборостроения РАН
http://ntcup.ru

ARMIMP-2020
WEB: http://www.armimp.ru
DOI: 10.25210/armimp-2020

ISBN 978-5-905278-44-0
9 785905 278440