

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Мартынов Григорий Николаевич

ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ПРОПУСКАНИЯ
АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ В ЗАДАЧАХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ
СЪЕМКИ

Специальность: 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологический центр Уникального приборостроения Российской академии наук (ФГБУН НТЦ УП РАН)

Научный руководитель:

Пожар Витольд Эдуардович,
д.ф.-м.н., зав.отд., ФГБУН НТЦ УП РАН

Официальные оппоненты:

Гуревич Борис Симхович
д.т.н., г.н.с. ФГБУН Институт аналитического
приборостроения РАН (ИАП РАН),

Доброленский Юрий Сергеевич
к.ф.-м.н., зав.лаб., ФГБУН Институт космических
исследований РАН (ИКИ РАН),

Ведущая организация:

Научно-технологический и учебный центр акустооптики
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»

Защита состоится 02.11.2022 в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.185.01 (Д 002.135.01) на базе Научно-технологического центра Уникального приборостроения РАН по адресу 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, в конференц. зале.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН и на сайте <http://ntcup.ru/zashhita-dissertacij/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.185.01 (Д 002.135.01),
к.т.н.



В.И. Батшев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Акустооптические (АО) фильтры оптического излучения, использующие эффект АО-взаимодействия – спектрально-селективную дифракцию света на динамической Брэгговской решетке, наведенной в упругой среде ультразвуком – широко применяются в разнообразных оптических устройствах, приборах и экспериментальных установках. АО-фильтры используются в составе спектрометров, спектрально перестраиваемых источников света и гиперспектральных систем, позволяющих получать изображения объектов в узких спектральных интервалах, обеспечивая тем самым возможность спектрального контрастирования или восстановления спектральных характеристик объектов при дальнейшем анализе. Технология спектральной съемки с помощью приборов на базе АО-фильтров нашла свое применение во многих областях науки и техники: биомедицине [1–6], сельском хозяйстве [7], астрономии [8,9] и т.д.

Важным фундаментальным свойством АО-фильтров является неоднородность их пространственно-спектральной функции пропускания, связанная со сложной структурой фазового синхронизма при дифракции в анизотропном материале АО-ячейки. Действительно, в результате дифракции падающего света на ультразвуке некоторой частоты f , в любом направлении θ распространяются компоненты светового потока, охватывающие некоторый спектральный интервал $\nu_B(\theta) \pm \Delta\nu/2$ (полосу пропускания), зависящий от угла падения света на ультразвуковую решетку. Следует отметить, что это свойство известно и используется для пространственной фильтрации монохроматического света [10–13]. Однако, при создании гиперспектральных систем, основным назначением которых является получение монохроматических изображений объектов, оно играет роль ограничивающего фактора. Чтобы полный угловой дрейф брэгговской длины волны не превышал величины полосы пропускания $\nu_B(\theta_{\max}) - \nu_B(\theta_{\min}) < \Delta\nu$ и не вызвал тем самым уширения полосы, угловое поле зрения АО-фильтра ограничивают до величины $\Delta\theta = \theta_{\max} - \theta_{\min}$. Поэтому при разработке АО гиперспектральных систем, АО-фильтры часто рассматриваются как идеальные монохроматоры, работающие в некотором ограниченном, не очень большом угловом поле $\Delta\theta$. Таким образом, для задач гиперспектральной съемки остается актуальным вопрос возможности расширения углового поля АО-фильтра за указанные пределы и, соответственно, возможности расширения поля зрения $\Delta\theta$ АО-гиперспектрометров без уширения их спектральной полосы пропускания $\Delta\nu$.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка нового подхода к проектированию АО спектральных устройств, позволяющего расширить их поле зрения без уширения полосы пропускания.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи

1. Анализ причин, ограничивающих входной рабочий диапазон углов (угловую апертуру) в АО спектральных устройствах.
2. Анализ и развитие модели пространственно-спектрального преобразования излучения при акустооптической дифракции. Изучение пространственно-спектральных функций передачи АО-фильтров.
3. Оценка влияния пространственно-спектральной неоднородности функций передачи АО-фильтров на качество изображения в АО спектральных устройствах. Сравнение характера этого влияния в различных оптических схемах (коллимирующей и конфокальной).
4. Формулировка подхода к построению АО спектральных устройств с величиной поля зрения, превышающей классическое («квазимонохроматическое») значение.
5. Разработка метода на основе предварительной пространственно-спектральной калибровки спектральных изображающих АО-систем.
6. Формулировка предложений по реализации метода коррекции пространственно-спектральных искажений в АО спектральных устройствах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлен характер влияния особенностей структуры фазового синхронизма на структуру пространственно-спектральной неоднородности в спектральных снимках, получаемых с помощью гиперспектральных систем на основе АО-фильтров.
2. Предложен и реализован метод численной коррекции пространственно-спектральной неоднородности в изображениях, зарегистрированных с помощью гиперспектрометров, построенных по коллимирующей схеме, для получения неискаженных монохроматических изображений.
3. Показана возможность эффективной регистрации АО-фильтрами спектральных изображений в поле зрения, превышающем монохроматическую угловую апертуру.
4. Показана возможность использования АО-фильтров с произвольной геометрией АО-взаимодействия для получения неискаженных монохроматических изображений.

Практическая значимость работы

Результаты, изложенные в диссертационной работе, могут быть использованы как для улучшения характеристик уже созданных гиперспектральных систем, так и для создания гиперспектральных систем с новыми свойствами. В работе получены следующие практически значимые результаты.

1. Возможность коррекции пространственно-спектральной неоднородности в изображениях, регистрируемых гиперспектрометрами, построенными по коллимирующей схеме, позволяет получать монохроматические неискаженные изображения, что повышает точность восстановления спектральных характеристик снимаемых объектов.
2. Продемонстрированный метод коррекции пространственно-спектральной неоднородности применим как для уже созданных гиперспектрометров на базе АО-фильтров, так и для проектирования гиперспектрометров без ограничения поля зрения АО-фильтров.
3. Разработанный метод применим для любых АО-фильтров, а не только широкоапертурных, поэтому выбор АО-фильтров для гиперспектрометров может вестись по существенно большему множеству, включающему все широкоапертурные геометрии как подмножество.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Пространственно-спектральная неоднородность функции пропускания АО-фильтров, обусловленная структурой фазового синхронизма, существенно влияет на качество спектральных изображений, регистрируемых АО-гиперспектрометрами, и требует ее учета при восстановлении спектральных характеристик объектов.
2. Тип оптической системы (ОС) АО-гиперспектрометра определяет качество спектральных изображений и тип вносимых искажений изображения, требующих соответствующих учета или коррекции:
 - изображения, получаемые в коллимирующей схеме ОС, обладают пространственно-спектральной неоднородностью, повторяющую угловую зависимость пространственно-спектральной неоднородности функции пропускания АО-фильтров;
 - изображения, получаемые в конфокальной схеме ОС, испытывают модуляцию по интенсивности из-за влияния неоднородности акустического поля внутри ячейки, но остаются при этом пространственно-спектрально однородными за счет интегрирования пространственно-спектральной функции пропускания по углу.
3. Предварительная калибровка пространственно-спектральной неоднородности в АО гиперспектральных системах, построенных по коллимирующей схеме ОС, и последующая программная корректировка регистрируемых спектральных изображений, позволяют получать монохроматические неискаженные изображения в поле зрения широкоапертурного АО-фильтра, превышающем его монохроматическую угловую апертуру (составляющую обычно 2-4 градуса).

4. АО-фильтры, не использующие широкоапертурную (тангенциальную) геометрию дифракции, могут быть использованы в гиперспектральных системах для получения изображений, пространственно-спектральная неоднородность функции пропускания которых может быть устранена с использованием стандартных методов программной обработки изображений на основе проведенной предварительной калибровки.

Достоверность результатов диссертационной работы

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач и использованных приближений, выбором и использованием известных и апробированных физических моделей, а также согласием результатов моделирования и экспериментальных измерений.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в диссертации и опубликованных работах, получены автором лично или при непосредственном участии совместно с соавторами – коллективом лаборатории Акустооптической спектроскопии НТЦ УП РАН. Автор лично получил основные экспериментальные результаты, демонстрирующие влияние пространственно-спектральных функций пропускания АО-фильтров на качество спектральных изображений, участвовал в формулировке задачи исследований и проводил анализ результатов. Часть экспериментального сравнения схем АО-гиперспектрометров на базе широкоапертурного АО-фильтра проводилась совместно с Батшевым В.И. Часть теоретического анализа и численного моделирования, использованного для сравнения с полученными экспериментальными результатами, была проведена совместно с Горевым А.В. и Мачихиным А.С.

Апробация результатов диссертационной работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- 1.12-ой международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», Москва, 2019;
- 2.Международной конференции SPIE Optical Metrology, Мюнхен, онлайн-доклад, 2021;
- 3.Международной конференции OSA Optical Sensors and Sensing Congress, онлайн-доклад, 2021;
- 4.Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» Самара, онлайн-доклад, 2021.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, и 4 тезиса докладов.

Общая структура диссертационной работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 129 наименований цитируемых источников. Работа изложена на 102 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации состоит из двух частей. В первой части главы проведен исторический обзор развития акустооптики, проанализированы этапы ее становления от теоретической дисциплины до развитой области техники. Описаны основные типы функциональных АО-устройств и кратко рассмотрены принципы их работы и области применения. Во второй части рассмотрены классические подходы к АО-фильтрации света и принципы построения АО-гиперспектрометров.

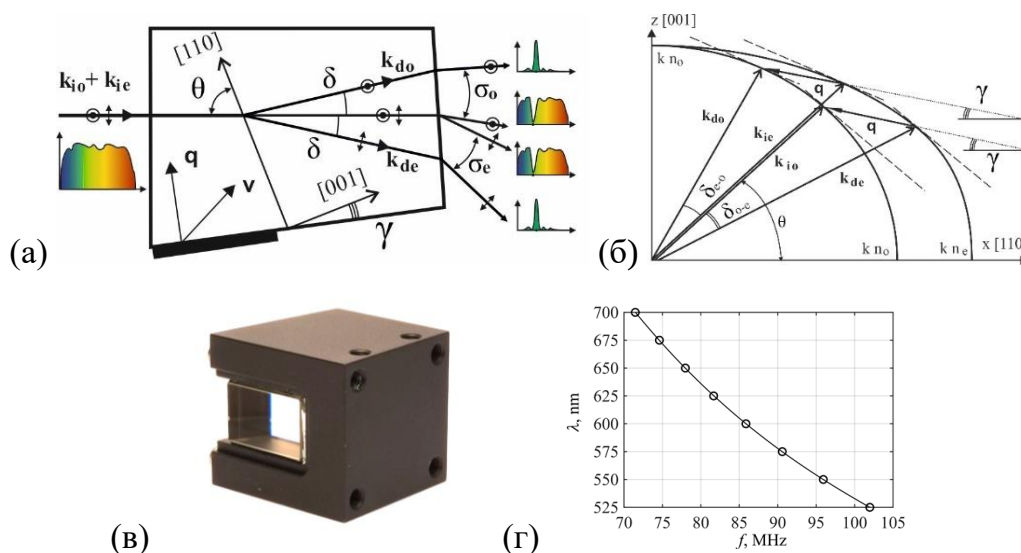
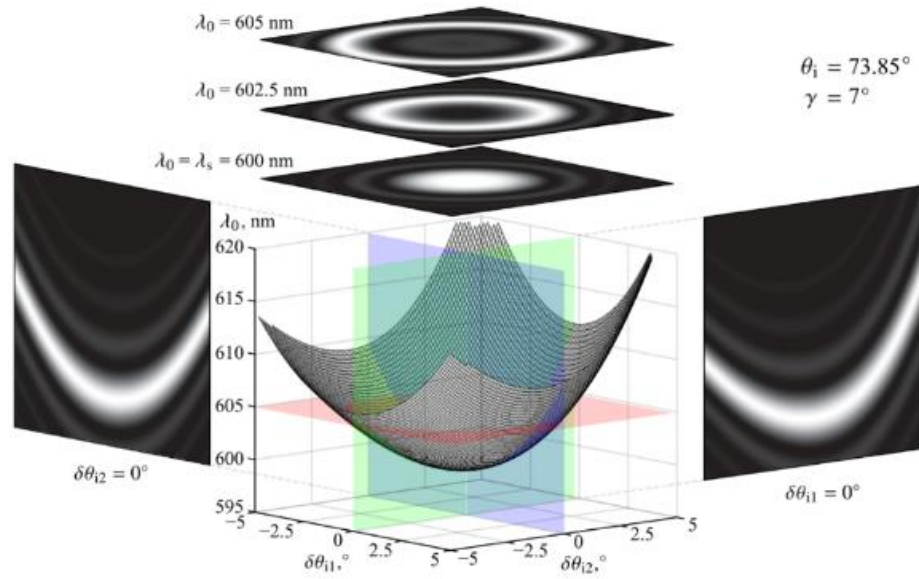


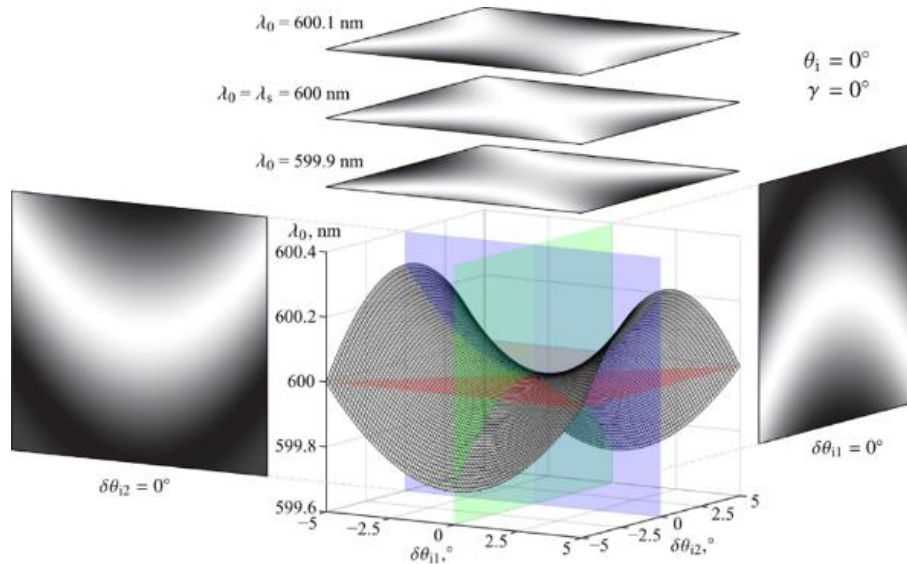
Рис. 1. Акустооптическая фильтрация света а) Схематичное изображение АО-фильтра, б) диаграмма волновых векторов в) АО-ячейка неколлинеарного широкоапертурного фильтра, НТЦ УП РАН, г) типичная перестроечная характеристика АО-фильтра

АО-фильтры (рис. 1) – устройства, реализующие АО-взаимодействие, позволяющее выделять из света, распространяющегося в определенном направлении θ_i , излучение необходимого спектрального диапазона в пределах некоторого спектрального окна шириной $\Delta\lambda$ с центральной длиной волны λ_s , определяемого частотой ультразвука f , наводящего Брэгговскую решетку. Одна из ключевых фундаментальных особенностей АО-фильтрации – пространственно-спектральная неоднородность фильтруемого пучка на выходе из АО-фильтра, обусловленная особенностями структуры фазового синхронизма для волновых векторов падающего света k_i , дифрагированного света k_d и ультразвука q :

$\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_i \pm \mathbf{q}$. Несмотря на то, что это свойство АО-фильтрации часто используется для пространственной фильтрации света, в спектроскопии и гиперспектрометрии поле зрения широкоапертурных АО-фильтров ограничивается до пределов монохроматической угловой апертуры, и они используются как перестраиваемые монохроматоры, однозначно характеризуемые угловой апертурой $\Delta\theta$, в пределах которой выделяется спектральная компонента λ_s , шириной окна пропускания $\Delta\lambda$ и перестроечной характеристикой $\lambda_s(f)$, устанавливающей соответствие между частотой ультразвука и центральной длиной волны окна пропускания для волнового вектора, распространяющегося вдоль оптической оси ячейки.



(a)



(б)

Рис.2. Поверхности фазового синхронизма $|\Delta\mathbf{k}_m(\lambda_0, \delta\theta_{i1}, \delta\theta_{i2})| = 0$ и сечения функции пропускания $T(\lambda_0, \delta\theta_{i1}, \delta\theta_{i2})/(GL)^2$ для коллинеарной (а) и неколлинеарной (б) геометрий взаимодействия.

В главе рассмотрены классические типовые схемы фильтрации в АО-гиперспектрометрах, результаты экспериментальных исследований качества изображения, передаваемого в них, а также некоторые из созданных в ходе работы приборов. В конце главы сформулированы проблемы АО-гиперспектрометрии на основе широкоапертурных АО-фильтров: малое поле зрения и неучет пространственно-спектральной неоднородности функции пропускания АО-фильтров (рис. 2), потенциально приводящей к искажениям в регистрируемых спектральных данных. Таким образом, для развития методов АО-гиперспектрометрии актуальны задача развития модели АО-фильтрации для случая неколлимированных пучков широкого спектрального диапазона, оценка характера влияния пространственно-спектральной неоднородности на искажения спектральных изображений и поиск методов коррекции такого влияния.

Вторая глава диссертации подробно рассматривает вопрос построения модели пространственно-спектрального преобразования неколлимированных пучков с широким спектральным составом в АО-устройствах, необходимой для построения АО-гиперспектрометров, эффективно использующих поле зрения АО-фильтров за пределами монохроматической угловой апертуры.

Модель основана на аналитическом методе, описывающем преобразование пучка при дифракции на плоской волне ультразвука $\mathbf{q}_s$ путем введения вектора волновой расстройки $\Delta\mathbf{k}$ в условие для волновых векторов [14]:

$$\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_i \pm \mathbf{q}_s + \Delta\mathbf{k}. \quad (1)$$

При таком подходе, дифрагированное поле может быть представлено как сумма угловых компонент, описываемых направлением волнового вектора $\mathbf{e}_{kdm}$, при котором волновая расстройка минимальная, и функцией пропускания $T(\lambda_0, \mathbf{e}_{ki})$ по формулам:

$$\mathbf{e}_{kdm}(\lambda_0, \mathbf{e}_{ki}) = \arg \min |\Delta\mathbf{k}(\lambda_0, \mathbf{e}_{ki}, \mathbf{e}_{kd})|, \quad (2)$$

$$\Delta\mathbf{k}_m(\lambda_0, \mathbf{e}_{ki}) = \Delta\mathbf{k}(\lambda_0, \mathbf{e}_{ki}, \mathbf{e}_{kdm}), \quad (3)$$

$$T(\lambda_0, \mathbf{e}_{ki}) = (\Gamma L)^2 \text{sinc}^2 \left[L \sqrt{\Gamma^2 + \left(\frac{|\Delta\mathbf{k}_m|}{2} \right)^2} \right], \quad (4)$$

где $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$, Γ – коэффициент связи, пропорциональный эффективной фотоупругой постоянной и амплитуде ультразвуковой волны, L – длина АО-взаимодействия.

Для АО-взаимодействия типа $e \rightarrow o$, уравнения для $\mathbf{k}_{dm}(\lambda_0, \mathbf{e}_{kdm})$ и $|\Delta\mathbf{k}_m|$ могут быть выведены аналитически:

$$\mathbf{e}_{kdm} = (\xi_a \mathbf{e}_{ki} + \eta_a \mathbf{e}_{qs}) / (1 + \chi), \quad (5)$$

$$|\Delta\mathbf{k}_m| = 2\pi n_o(\lambda_0) \chi / \lambda_0, \quad (6)$$

$$\chi = \sqrt{(\xi_a - \eta_a)^2 + 2\xi_a \eta_a (1 - A_a)} - 1, \quad (7)$$

где $\xi_a = \xi(\lambda_0, \mathbf{e}_{ki})$, $\eta_a = \lambda_0 f_s / [V(\mathbf{e}_{qs}) n_o(\lambda_0)]$, и $A_a = -\mathbf{e}_{ki} \cdot \mathbf{e}_{qs}$ – параметр двулучепреломления, спектральный и геометрический параметры.

Уравнение $|\Delta \mathbf{k}_m(\lambda_0, \mathbf{e}_{ki})| = 0$ определяет поверхность точек в пространственно-спектральной области $(\lambda_0, \delta\theta_{i1}, \delta\theta_{i2})$, показывающую длины волны и направления распространения пространственных компонент, удовлетворяющих условию фазового синхронизма. Такие поверхности фазового синхронизма наиболее наглядно и полно характеризуют АО-фильтры, по сравнению с устоявшимися параметрами: угловой апертурой, шириной полосы пропускания и перестроенной кривой, определяемой для центрального луча, соответствующего лишь одной точке на предлагаемой поверхности.

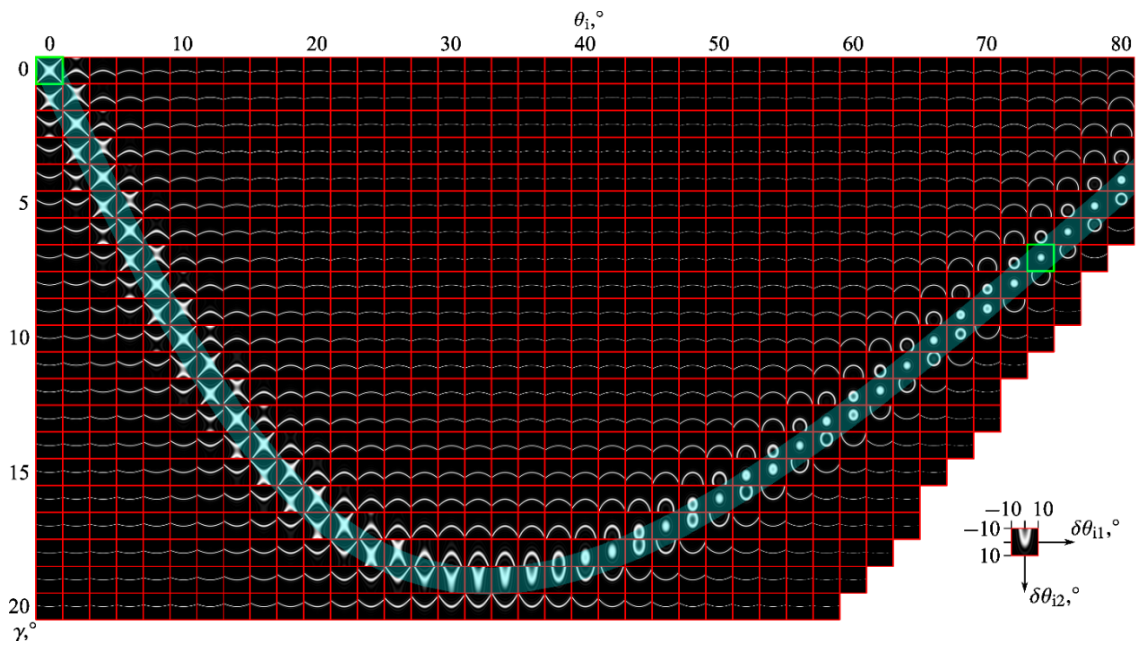
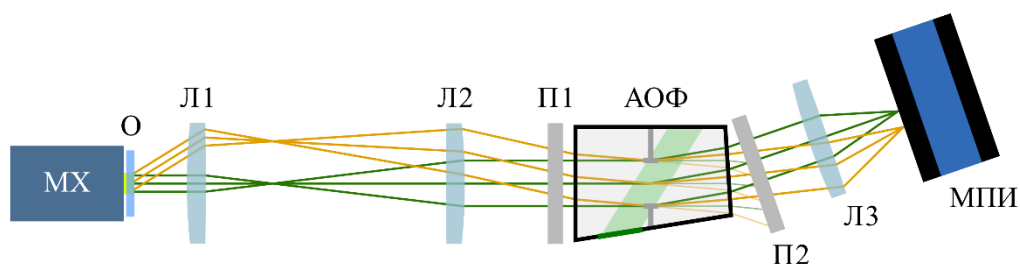


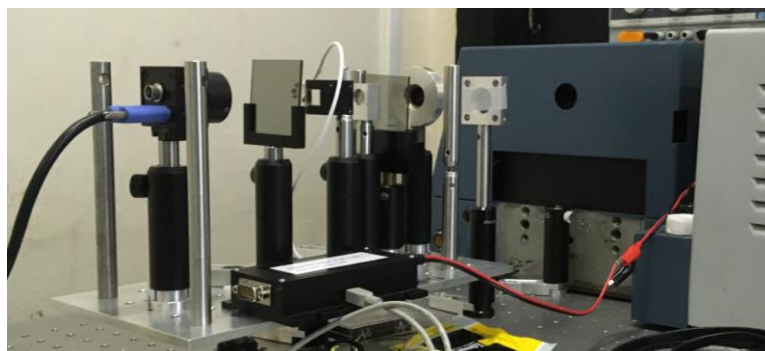
Рис. 3. Семейство монохроматических угловых апертур $T(\delta\theta_{i1}, \delta\theta_{i2})/(\Gamma L)^2$ в одноосном кристалле при $\lambda_0 = \lambda_s = 600$ нм для разных геометрий АО-взаимодействия. Циановой линией обозначены широкоапертурные геометрии. Зеленые квадраты обозначают коллинеарную и неколлинеарную геометрии, проиллюстрированные на рис. 2. На вставке показано направление осей и диапазон углов в каждом изображении $(\delta\theta_{i1}, \delta\theta_{i2})$, равный $\pm 10^\circ$.

Результаты численного расчета пространственно-угловых функций пропускания для различных геометрий АО-взаимодействия с учетом преломления на входной и выходной гранях АО-ячейки показаны на рис. 3. На рис. 2 подробно рассмотрены пространственно-спектральные функции пропускания и поверхности фазового синхронизма для наиболее часто используемых геометрий АО-взаимодействия: широкоапертурных коллинеарной и неколлинеарной.

Для экспериментального измерения пространственно-спектральных функций пропускания АО-фильтров была предложена методика, в основе которой лежит последовательная регистрация изображений однородного рассеивателя, подсвечиваемого перестраиваемым монохроматическим излучением (рис. 4).



(а)



(б)

Рис. 4. Экспериментальная установка для измерения двумерных функций пропускания АО-фильтров. а) Схема установки МХ – монохроматор; О – объект-рассеиватель; Л1, Л2 – сопрягающая оптическая система; П1, П2 – поляризаторы, АОФ – АО-фильтр, Л3 – объектив, МПИ – матричный приемник излучения. б) Фотография экспериментального стенда.

Результаты экспериментальных измерений пространственно-спектральных функций пропускания неколлинеарного АО-фильтра на парателлурите приведены на рис. 5. Первая серия измерений с узкой щелью монохроматора (шириной 1 нм) показывает пространственно-спектральную структуру функции пропускания. В ходе измерений управляющий сигнал АО-фильтра не изменялся, подобранная частота ультразвука $f_s = 85,5$ МГц соответствовала центральной длине волны пропускания $\lambda_s = 600$ нм, при этом осуществлялась перестройка центральной длины волны пропускания λ_{MC} с шагом 1 нм (рис. 5а).

Полученные экспериментальные изображения (нижний ряд на рис. 5а) соответствуют сечениям функции пропускания в трехмерном пространстве (рис. 2а): от круглого пятна при $\lambda_{MC} = \lambda_s = 600$ нм, до расширяющихся кругов при λ_{MC} в диапазоне от 602 до 606 нм. Чтобы наглядно продемонстрировать спектральные свойства отфильтрованного пучка путем визуализации распределения цветовых оттенков, эксперимент был повторен с цветной RGB-камерой. Эксперимент с узкой щелью (1 нм, что в 3 раза меньше полуширины АО-фильтра) позволяет визуализировать отдельные спектральные компоненты с изменением цвета от зеленого до оранжевого (рис. 5в).

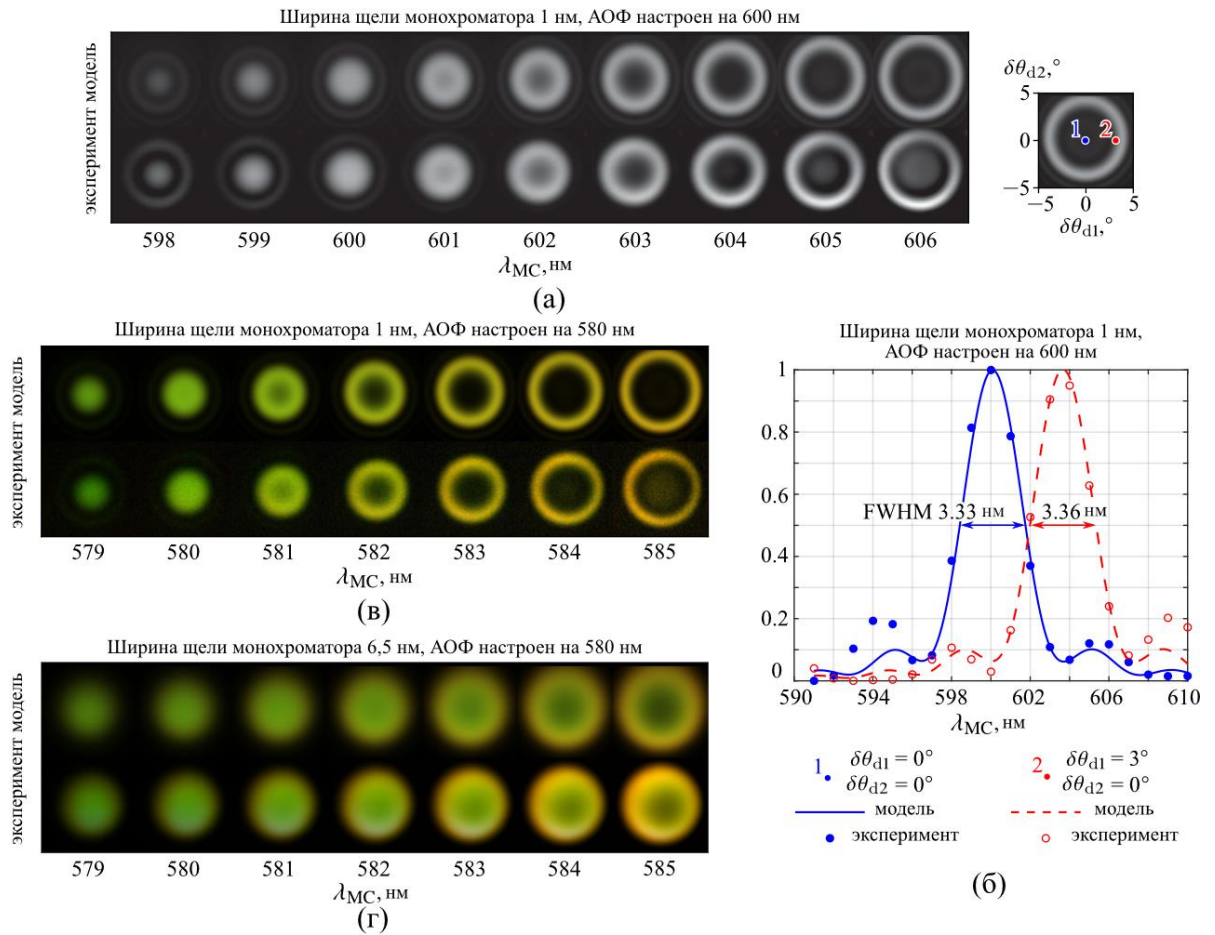


Рис. 5. Функции пропускания АО-фильтров. (а) Расчетные (верхний ряд) и экспериментально измеренные (нижний ряд), снятые монохромной камерой при фиксированной частоте управляющего сигнала АО-фильтра $f_s = 85,5$ МГц (соответствует $\lambda_s = 600$ нм) при сканировании длины волны монохроматора МС при ширине щели 1 нм. Диапазон углов $(\delta\theta_{i1}, \delta\theta_{i2})$ составляет $\pm 5^\circ$ в каждом изображении. (б) Спектры пропускания АО-фильтров в точках 1 ($0^\circ, 0^\circ$) и 2 ($3^\circ, 0^\circ$), показанных на рис. 5а справа. Расчетные и экспериментально измеренные функции пропускания, снятые цветной камерой при фиксированной частоте управляющего сигнала АО-фильтра $f_s = 89,2$ МГц (соответствует $\lambda_s = 580$ нм) для ширины щели 1 нм (в) и 6,5 нм (г).

Для уширенной щели (6,5 нм, в 2 раза шире FWHM функции пропускания АО-фильтра, рис. 5г) монохроматические функции пропускания накладываются, и изображения становятся спектрально неоднородными, что можно увидеть по зеленому оттенку кругов, переходящему в оранжевый на краях изображения.

Третья глава диссертации посвящена анализу влияния пространственно-спектральной неоднородности функции пропускания АО-фильтров на качество спектральных изображений. Приведены результаты исследований качества спектральных изображений, получаемых АО-гиперспектрометрами, построенными по коллимирующей (рис. 6а) и конфокальной телецентрической [15] (рис. 6б) схемам. Оценка пространственно-спектральной неоднородности в получаемых изображениях основана на

экспериментальной методике, заключающейся в последовательной съемке однородного рассеивателя, подсвечиваемого перестраиваемым монохроматическим излучением.

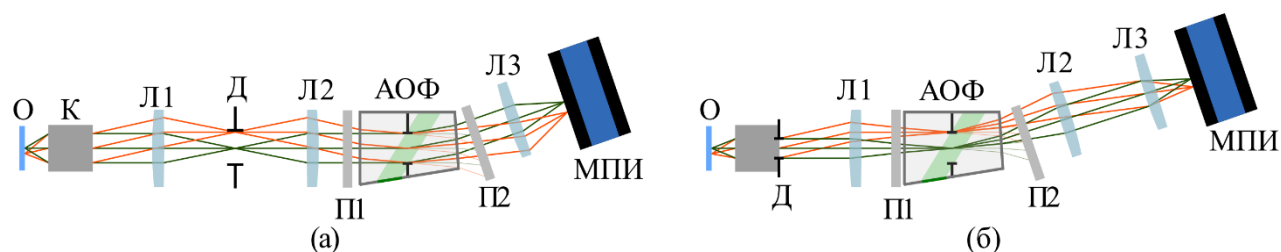


Рис. 6. Коллимирующая (а) и телецентрическая конфокальная (б) схемы гиперспектральных систем на основе АО-фильтров. О – объект; К – коллимирующий объектив; Д – диафрагма; Л1, Л2, Л3 – линзы; П1, П2 – поляризаторы; АОФ – АО-фильтр; МПИ – матричный приемник излучения.

Для оценки пространственно-спектральной неоднородности были сняты массивы изображений $I(u, v, f)$ однородного монохроматического светового поля при сканировании акустической частоты в диапазоне от 60 до 115 МГц с шагом 0,1 МГц для нескольких центральных длин волн λ_{MC} монохроматора ($\lambda_{MC} = 525...700$ нм, шаг 25 нм) с шириной щели 1 нм. Примеры спектральных изображений для $\lambda_{MC} = 650$ нм показаны на рис. 7а. Несмотря на маленькое анализируемое поле зрения ($\pm 2,4^\circ$), массивы спектральных снимков для каждой длины волны λ_{MC} обрабатывались для получения перестроечной характеристики $f(u, v)$, соответствующей максимальным значениям $I(u, v, f)$ в каждом пикселе. Экспериментально полученные распределения в выходных координатах $f(\delta\theta_{d1}, \delta\theta_{d2})$ показаны на рис. 7б. Массивы изображений $I(u, v, f)$ также использовались для оценки распределения ширины полосы частот Δf (FWHM) (рис. 7в).

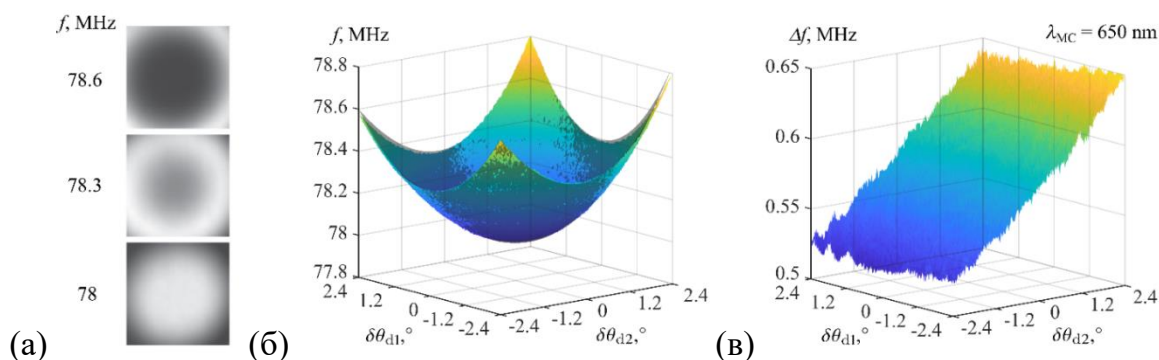


Рис. 7. Пространственно-спектральная неоднородность в коллимирующей схеме АО-гиперспектрометра. Примеры снятых изображений $I(u, v, f)$ (а). Экспериментальные (цветная) и модельные (серая) зависимости от частоты ультразвука f от угла падения для длины волны $\lambda_{MC} = 650$ нм (б). Экспериментальная зависимость ширины полосы пропускания Δf (FWHM) по всему полю зрения (в).

В экспериментах с конфокальной телецентрической схемой массив изображений $I(u, v, f)$ однородного монохроматического светового поля регистрировался при $\lambda_{MC} = 650$ нм, при той же ширине щели 1 нм и том же диапазоне частот ультразвука. Примеры изображений, показанные на рис. 8а, демонстрируют модуляцию яркости, вызванную неравномерной структурой акустического поля внутри АО-ячейки, влияющей на эффективность дифракции. На рис. 8б и 8в представлены результаты измерений пространственно-спектральной неоднородности и вариации ширины спектрального окна пропускания. Результаты эксперимента показывают, что и f , и Δf остаются примерно постоянными по всему полю зрения со стандартными отклонениями около 0,02 МГц и 0,01 МГц соответственно. Средняя ширина спектра $\Delta\lambda$ составляет 4,1 нм, что практически совпадает с $\Delta\lambda$ в центре поля зрения коллимирующей схемы.

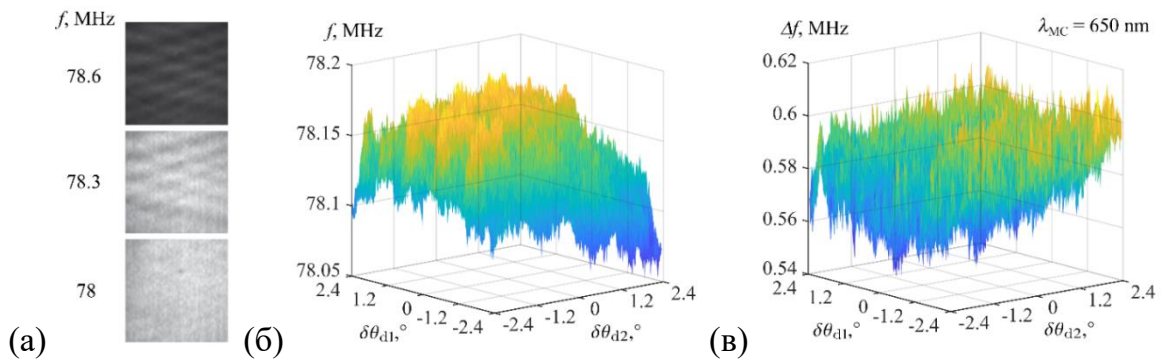


Рис. 8. Пространственно-спектральная функция пропускания в конфокальной схеме АО-гиперспектрометра. Примеры снятых изображений $I(u, v, f)$ (а). Экспериментальные (цветная) зависимости от частоты ультразвука f от угла падения для длины волны $\lambda_{MC} = 650$ нм (б). Экспериментальная зависимость ширины полосы пропускания Δf (FWHM) по всему полю зрения (в).

Для устранения пространственно-спектральной неоднородности в изображениях, регистрируемых АО-гиперспектрометрами с коллимирующей схемой ОС, предложен и продемонстрирован метод программной обработки. Предлагаемый метод корректировки (рис. 9) основан на установлении спектрально-частотной характеристики $f(u, v, \lambda)$ в каждой точке изображения (u, v) вместо использования для всего поля зрения перестроочной кривой АО-фильтра $\lambda(f)$, определенной только для центрального луча. Использование спектрально-частотной характеристики $f(u, v, \lambda)$ позволяет преобразовать массив полученных изображений $I(u, v, f)$ в скорректированный трехмерный массив данных $I(u, v, \lambda)$.

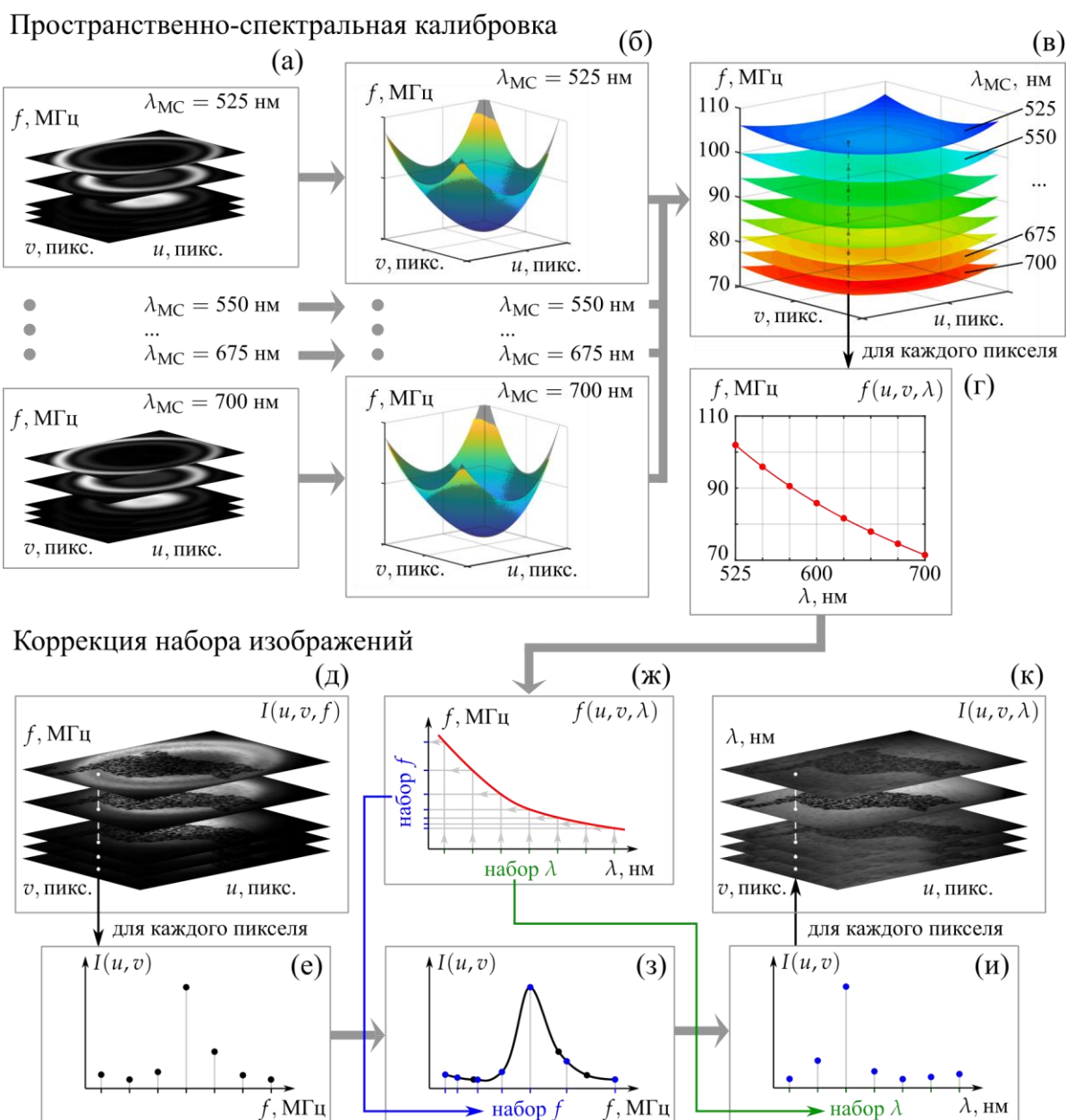


Рис. 9. Схема предлагаемого метода коррекции пространственно-спектральной неоднородности пропускания АО--фильтра. Пространственно-спектральная калибровка: полученные массивы изображений $I(u, v, f)$ для нескольких длин волн монохроматора $\lambda_{MC} = 525, 550, \dots, 700$ нм (а); вычисленные зависимости $f(u, v)$, соответствующие максимальной величине $I(u, v, f)$ в каждом пикселе, и согласованные с ними математические модели (б); объединенные модели для всех λ_{MC} (в) и полученные характеристики $f(u, v, \lambda)$ в каждом пикселе (г). Массив требуемых частот f вычисляется для заданного массива длин волн λ с использованием этих характеристик для каждого пикселя (ж). Коррекция массива изображений: полученный массив $I(u, v, f)$ (д) и значения сигнала в каждом пикселе (е); интерполяция значений сигнала для массива требуемых частот f (з); вычисленные значения сигнала в каждом пикселе (и) и скорректированный массив изображений $I(u, v, \lambda)$ (к).

Для проверки предложенного метода была проведена съемка цветного отпечатка (рис. 10б), подсвеченного лампой с линейчатым спектром (рис. 10а) с двумя характерными пиками в зеленой и красной области. Как показано на рис. 10в-д, снимки отпечатка в красной области около 611,5 нм, полученные с помощью коллимирующей схемы, демонстрируют пространственно-спектральную неоднородность. При этом снимок, полученный с помощью конфокальной схемы (рис. 10ж), является однородным, как и монохроматизированное изображение (рис. 10е), полученное с помощью предложенного метода.

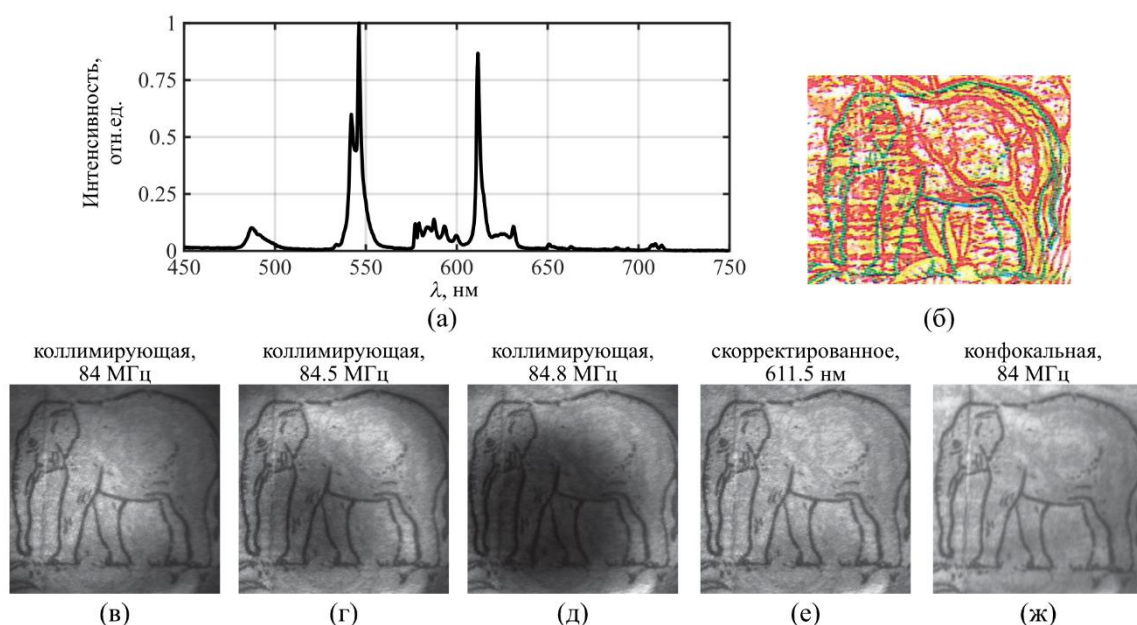


Рис. 10. Спектральные изображения цветного отпечатка, подсвеченного лампой с линейчатым спектром. (а) Спектр люминесцентной лампы; (б) отсканированное изображение цветного отпечатка; спектральные снимки, снятые при частоте управляющего ВЧ-сигнала 84 МГц (в), 84,5 МГц (г) и 84,8 МГц (д). Монохроматическое изображение на длине волны 611,5 нм, полученное с помощью пост-обработки массива изображений, зарегистрированным АО-гиперспектрометром, построенным по коллимирующей схеме (е). Изображение, снятое АО-гиперспектрометром, построенным по конфокальной схеме при частоте ВЧ-сигнала 84 МГц (ж).

Четвертая глава посвящена обсуждению возможности использования АО-фильтров без ограничения их поля зрения в АО-гиперспектрометрах. Предложенный метод использования всего доступного поля зрения АО-фильтров в АО-гиперспектрометрах, построенных по коллимирующей схеме, предполагает использование АО-гиперспектрометров без ограничивающей поле зрения диафрагмы, и применение метода корректировки пространственно-спектральной неоднородности путем установления перестроечной характеристики для каждого пикселя изображения $f(u, v, \lambda)$ в ходе калибровки. При этом, предложенный метод устраняет обязательное требование применения широкоапертурной геометрии, позволяя использовать АО-фильтры с такой геометрией взаимодействия, в которой угловая апертура произвольна.

Пространственно-спектральная неоднородность в изображениях гиперспектрометра с широкоапертурной геометрией взаимодействия, показана на рис. 11а-б. В результате эксперимента были получены массивы изображений $I(u, v, f)$ (при изменении частоты f в диапазоне от 60 МГц до 110 МГц с шагом 0,1 МГц) для нескольких центральных длин волн монохроматора λ_{MC} от 525 нм до 700 нм с шагом 25 нм, ширина щели монохроматора 1 нм. В этом случае отчетливо видно светлые кольца, соответствующие сечениям поверхности $f(\delta\theta_{i1}, \delta\theta_{i2})$. Красный прямоугольник на рис. 11б соответствует обычно используемому угловому полю 4° , в пределах которого отклонение частоты (или длины волны) достаточно мало. При каждой длине волны настройки монохроматора λ_{MC} для каждого пикселя полученного массива изображений $I(u, v, f)$ была найдена частота $f(u, v)$, соответствующая максимальной величине сигнала. Далее полученная экспериментальная зависимость $f(u, v)$ была совмещена с зависимостью $f(\delta\theta_{d1}, \delta\theta_{d2})$, построенной в результате моделирования. Пример совмещения показан на рис. 11в: цветная поверхность соответствует экспериментальным данным, а серая — данным моделирования. Результаты демонстрируют хорошее совпадение экспериментальных данных с моделированием: среднеквадратическая ошибка (RMSE) не превышает 0,03 МГц для всех λ_{MC} .

Массив таких совмещенных зависимостей $f(\delta\theta_{d1}, \delta\theta_{d2})$, полученный для всех λ_{MC} , был далее использован, чтобы интерполировать спектрально-частотные (перестроечные) характеристики $f(u, v, \lambda)$ для каждого пикселя в пределах рабочего диапазона длин волн λ_{MC} , как показано на рис. 11д. При помощи этих характеристик для каждого пикселя можно вычислить массив требуемых частот f , соответствующий заданному массиву длин волн λ , как было показано в главе 3.

Если геометрия АО-взаимодействия отличается от широкоапертурной (рис. 12а-б), изохроматические ($\lambda = const$) линии являются фрагментами колец большого размера и видны на изображениях полученного массива как светлые дуги (в соответствии с рисунком 12в-г). В таком случае вычисленная зависимость $f(\delta\theta_{d1}, \delta\theta_{d2})$ является монотонной по оси $\delta\theta_{d2}$. Результаты эксперимента согласуются с моделированием, среднеквадратическая ошибка (RMSE) не превышает 0,02 МГц. Полученные в результате эксперимента значения ширины полосы частот Δf для наклонной геометрии меньше, чем для широкоапертурной, при этом изменения Δf в пределах анализируемого углового поля для наклонной геометрии также меньше в абсолютных значениях (рис. 12е).

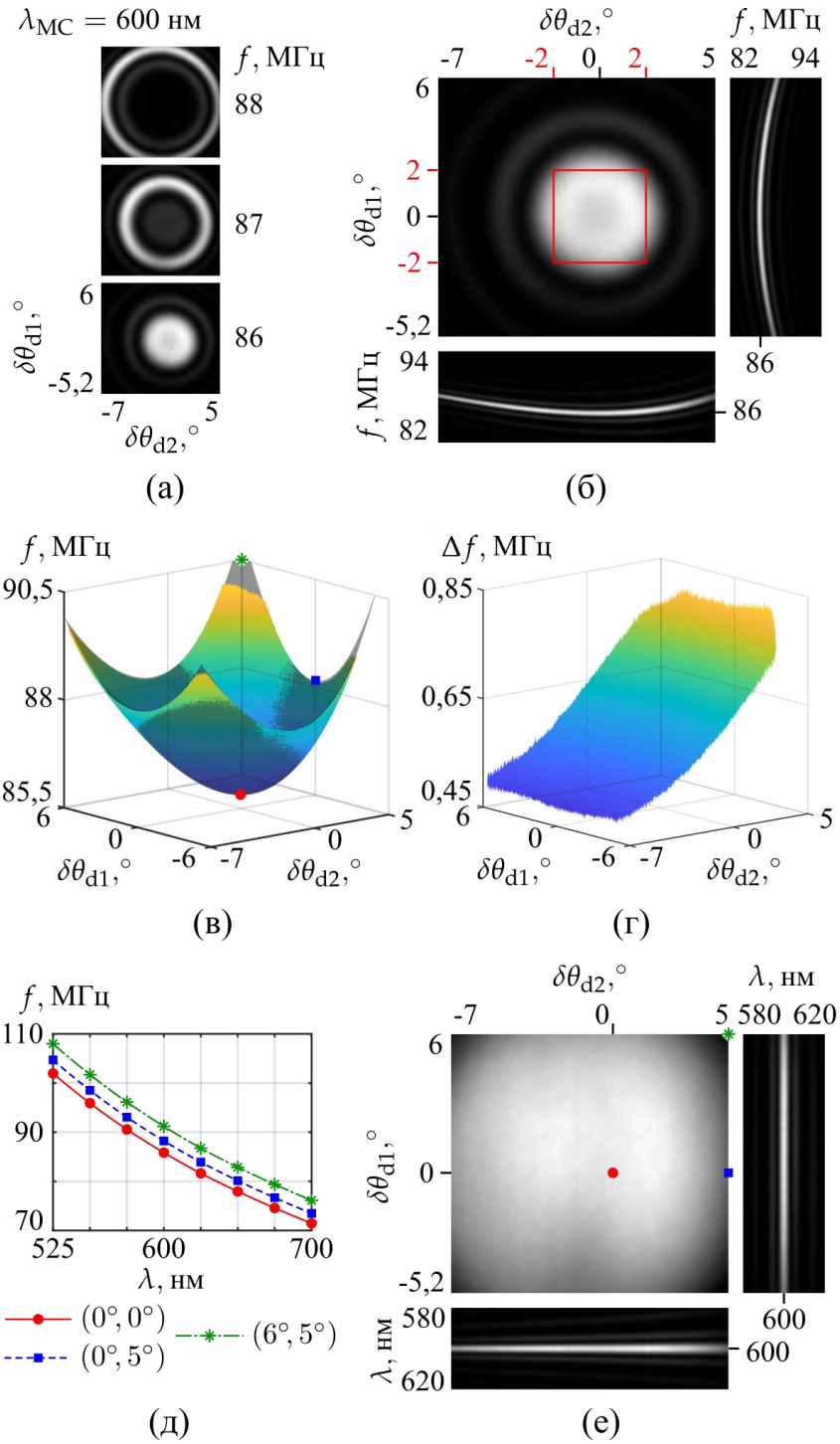


Рис. 11. Широкоапертурная геометрия АО взаимодействия. Примеры изображений, полученных при разных частотах ультразвука f (а); сечения полученного массива изображений (б); полученные экспериментально (цветные поверхности) и в результате моделирования (серые поверхности) зависимости частоты f (в) и ширины полосы пропускания (FWHM) Δf (г) от углов $(\delta\theta_{d1}, \delta\theta_{d2})$ на выходе из ячейки. Все примеры приведены для длины волны монохроматора $\lambda_{MC} = 600$ нм с шириной щели (полосы пропускания) 1 нм. Вычисленные зависимости $f(\lambda)$ для разных точек изображения (д) и сечения преобразованного массива монохроматических изображений для $\lambda_{MC} = 600$ нм (е). Маркеры, обозначающие разные точки изображения, одинаковы на рисунках (в), (д) и (е).

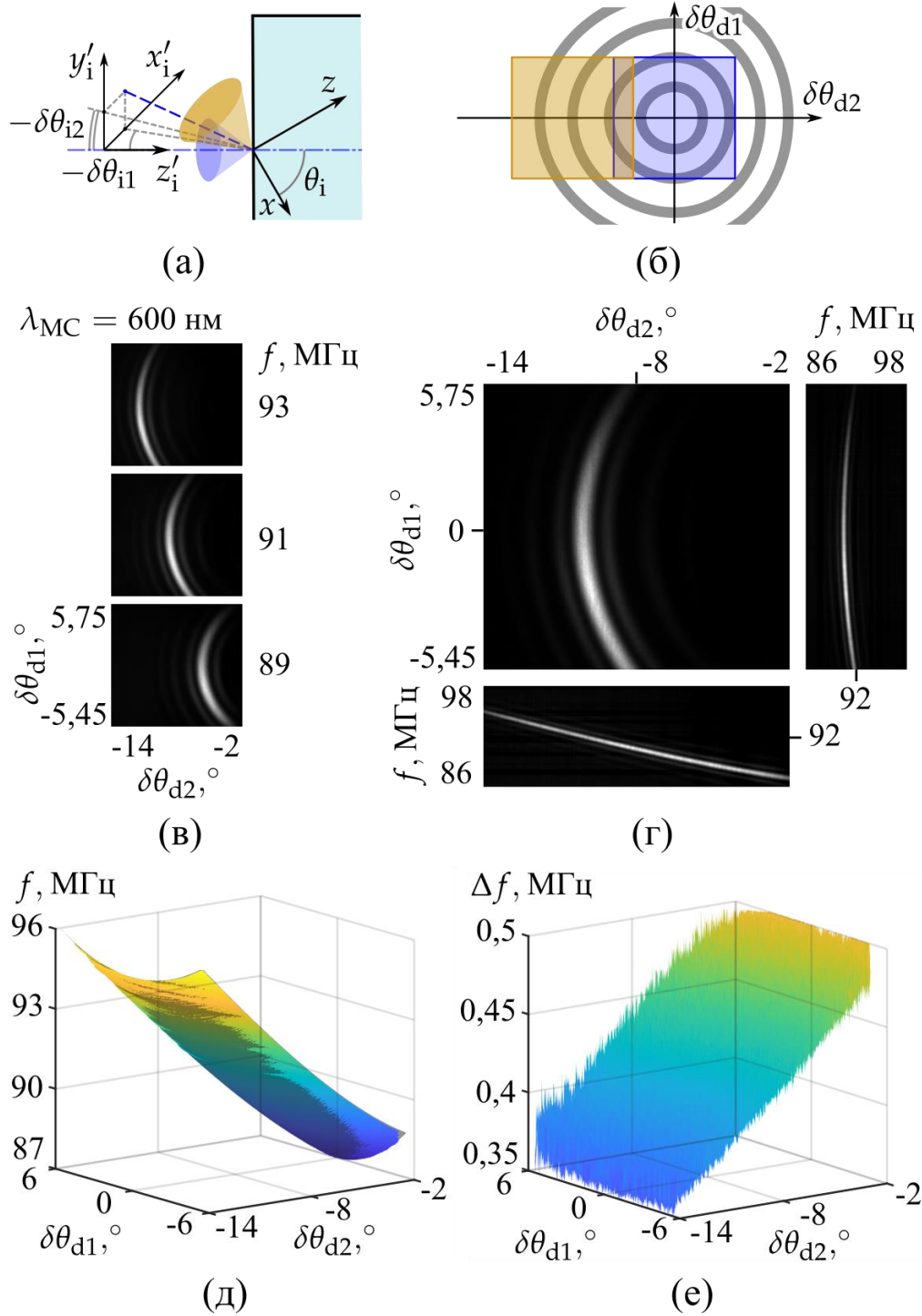


Рис. 12. Наклонная геометрия АО взаимодействия. Относительное расположение угловых полей на входе в АО ячейку (а) и диаграмма функции пропускания (б) для широкоапертурной (синий цвет) и наклонной (желтый цвет) геометрии. Примеры изображений, полученных при разных частотах ультразвука f (в); сечения полученного массива изображений (г); полученные экспериментально (цветные поверхности) и в результате моделирования (серые поверхности) зависимости частоты f (д) и ширины полосы пропускания (FWHM) Δf (е) от углов ($\delta\theta_{d1}, \delta\theta_{d2}$) на выходе из ячейки. Все примеры приведены для длины волны монохроматора $\lambda_{MC} = 600$ нм с шириной щели (полосы пропускания) 1 нм.

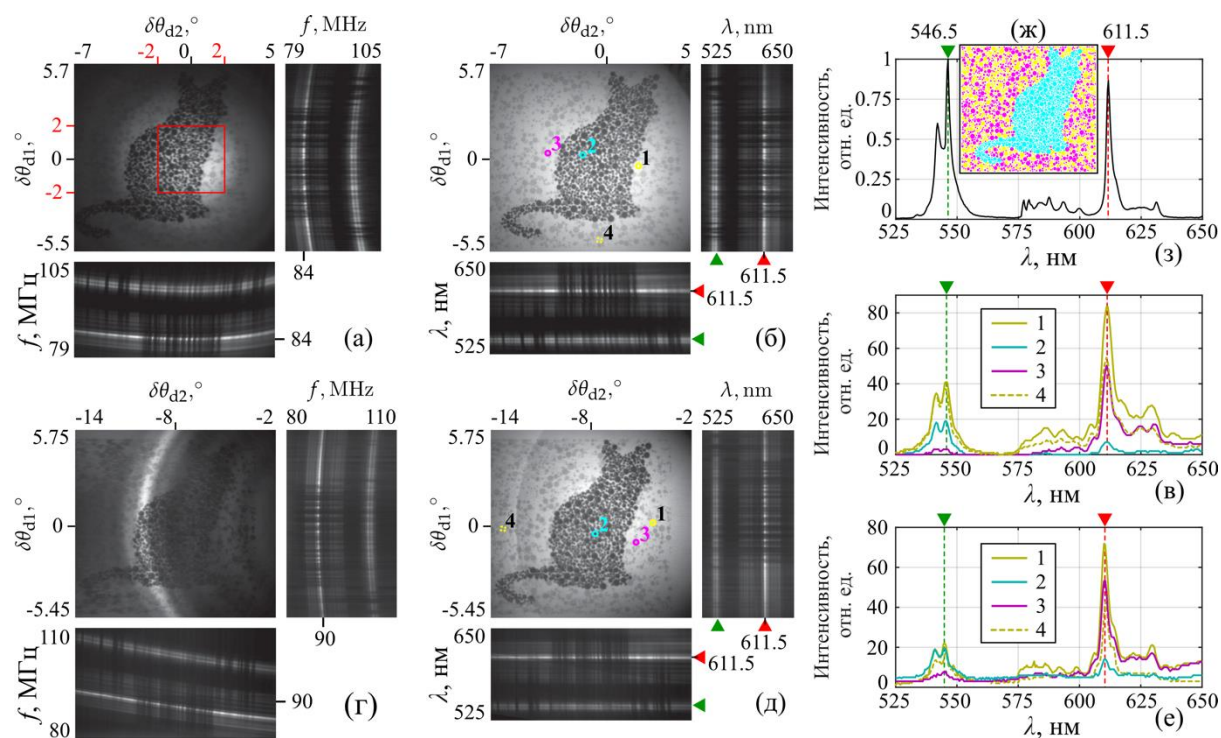


Рис. 13. Спектральные снимки тест-объекта. Исходные (а,г) и преобразованные (б,д) массивы (массивы) изображений; извлеченные из преобразованных массивов спектры (в,е) в нескольких точках изображения, соответствующих чернилам разных цветов; (а–в) соответствуют широкоапертурной геометрии, (г–е) — наклонной геометрии. Значения сигналов (в,е) приведены в произвольных единицах. (ж) Тест-объект - отпечатанное на принтере цветное изображение; (з) спектр люминесцентной лампы. Красный квадрат на рисунке (а) соответствует обычно используемому угловому полю $\pm 2^\circ$ по обеим осям.

Для обеих геометрий АО-взаимодействия после проведения пространственно-спектральной калибровки монохроматор МС и рассеиватель D были заменены объективом, чтобы зарегистрировать изображения различных объектов. В качестве тестового образца было использовано цветное изображение, напечатанное на фотобумаге (показано на рис. 13ж), поочередно освещенное двумя источниками света: галогенной лампой со светофильтром, не пропускающим излучение с длиной волны более 650 нм, и люминесцентной лампой. Спектр люминесцентной лампы имеет две явно различимые узкие линии (546,5 нм и 611,5 нм), которые хорошо заметны на сечениях как полученного массива изображений (рис. 13а и 13г), так и скорректированного (рис. 13б и 13д). На рис. 13в и 13е показаны примеры спектров, извлеченных из скорректированных массивов данных в четырех точках изображения, соответствующих чернилам различных цветов, которые демонстрируют, что спектральные линии не смещаются по длине волны при изменении положения точки на изображении, что говорит о правильно проведенной корректировке пространственно-спектральных искажений в изображении. Несмотря на разницу в спектрально-частотных зависимостях, результаты для обеих геометрий достаточно близки и подтверждают, что предложенный метод позволяет эффективно скорректировать пространственно-спектральную неоднородность пропускания АО-фильтров в обоих случаях.

Предложенный метод применим не только для широкоапертурной геометрии АО-взаимодействия, следовательно, ее использование для проектирования изображающих систем на основе АО-фильтров перестает быть строгим требованием. При этом, использование геометрии, отличающейся от широкоапертурной, приводит к увеличению требуемого диапазона частот ультразвука, но также позволяет уменьшить ширину спектральной полосы пропускания и ее вариации в пределах углового поля (при смещении в полярной плоскости в сторону от оптической оси кристалла). Предложенный метод особенно важен для работы с объектами, имеющими узкие линии в спектре при необходимости высокой точности спектральных измерений, а также может быть полезен в случаях, требующих использования поля зрения АО-фильтра за пределами монохроматической угловой апертуры.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы. В работе показана методика расчета пространственно-спектральных функций пропускания для случая фильтрации широкополосного излучения, проведена оценка пространственно-спектральной неоднородности изображений, регистрируемых АО-гиперспектрометрами. Показан метод коррекции пространственно-спектральной неоднородности в спектральных изображениях. Продемонстрирована возможность использования поля зрения АО-фильтров, превышающего монохроматическую угловую апертуру, без потери спектрального разрешения; а также возможность построения АО спектральной системы на основе неширокоапертурного АО-фильтра. Полученные результаты показывают важность учета структуры фазового синхронизма в АО-фильтрах и важны для развития АО-приборостроения и гиперспектрометрии.

Список опубликованных работ:

Тезисы конференций:

1. Мартынов Г.Н., Гапонов М.И., Фомин Д.С., Ременникова М.В. Изображающий спектрометр на базе перестраиваемого акустооптического фильтра для полевой съемки // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. – 2019. – С. 156-158.
2. Martynov G.N., Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Pozhar V.E. On inherent spatio-spectral image distortion in AOTF-based imagers // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII. International Society for Optics and Photonics, — 2021. — Vol. 11782. P. 1178219.
3. Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Martynov G.N., Khokhlov D.D., Pozhar V.E. Spatio-spectral Characterization of Acousto-optical Imagers // OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021 (AIS, FTS, HISE, SENSORS, ES) (2021), paper HTh4H.4. Optical Society of America, — 2021. P. HTh4H.4.
4. Батшев В. И., Мачихин А. С., Боритко С. В., Мартынов Г. Н., Горевой А. В., Моисеева Н. А. Двухпроходная схема акустооптической фильтрации для задач спектральной визуализации объектов // В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2021). Сборник трудов по материалам VII Международной конференции и молодежной школы. В 3-х томах. Самара, 2021. С. 12962. – С. 12962

Статьи в журналах:

5. Batshev V., Machikhin A., Martynov G., Pozhar V., Boritko S., Sharikova M., Lomonov V., Vinogradov A. Polarizer-Free AOTF-Based SWIR Hyperspectral Imaging for Biomedical Applications // Sensors. 2020. P. 10. (IF = 3.275)
6. Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Martynov G.N., Pozhar V.E. Spatiospectral transformation of noncollimated light beams diffracted by ultrasound in birefringent crystals // Photon. Res., PRJ. Optical Society of America, 2021. Vol. 9, № 5. P. 687–693. (IF = 6.099)
7. Batshev V., Machikhin A., Gorevoy A., Martynov G., Khokhlov D., Boritko S., Pozhar V., Lomonov V. Spectral Imaging Experiments with Various Optical Schemes Based on the Same AOTF // Materials. 2021. Vol. 14, № 11. P. 2984. (IF = 3.057)
8. Gorevoy A., Machikhin A., Martynov G., Pozhar V. Computational technique for field-of-view expansion in AOTF-based imagers // Opt. Lett., OL. Optica Publishing Group, — 2022. — Vol. 47, № 3. P. 585–588. (IF = 3.776)

Список используемой литературы

1. Treado P.J., Levin I.W., Lewis E.N. High-Fidelity Raman Imaging Spectrometry: A Rapid Method Using an Acousto-Optic Tunable Filter // *Appl Spectrosc.* — 1992. — Vol. 46, № 8. P. 1211–1216.
2. Pustovoit V.I. et al. Double-AOTF spectral imaging system / ed. Sliwinski A., Reibold R., Voloshinov V.B. Warsaw, Poland, — 2005. P. 59530P.
3. Wachman E.S. et al. Simultaneous imaging of cellular morphology and multiple biomarkers using an acousto-optic tunable filter-based bright field microscope // *J. Biomed. Opt.* — 2014. — Vol. 19, № 5. P. 056006.
4. Pannell C.N. et al. A high-performance passband-agile hyperspectral imager using a large aperture acousto-optic tuneable filter / ed. Soskind Y.G., Olson C. San Francisco, California, United States, — 2015. P. 936906.
5. Pozhar V.E. et al. Application of Acousto-Optical Hyperspectral Imaging for Skin Cancer Diagnostics // *Multimodal Optical Diagnostics of Cancer*. Springer, — 2020. P. 505–536.
6. Yushkov K.B. et al. AOTF-based hyperspectral imaging phase microscopy // *Biomed. Opt. Express.* — 2020. — Vol. 11, № 12. P. 7053.
7. Inoue Y., Peñuelas J. An AOTF-based hyperspectral imaging system for field use in ecophysiological and agricultural applications // *International Journal of Remote Sensing.* — 2001. — Vol. 22, № 18. P. 3883–3888.
8. Glenar D.A. et al. Multispectral Imagery of Jupiter and Saturn Using Adaptive Optics and Acousto-Optic Tuning // *PASP.* — 1997. — Vol. 109. P. 326.
9. Molchanov V.Ya. et al. An acousto-optical imaging spectrophotometer for astrophysical observations // *Astron. Lett.* — 2002. — Vol. 28, № 10. P. 713–720.
10. Balakshy V.I. et al. Optical image processing by means of acousto-optic spatial filtration // *Journal of Modern Optics.* — 2005. — Vol. 52, № 1. P. 1–20.
11. Kotov V.M. Processing of 2D Images Using the Bragg Diffraction // *J. Commun. Technol. Electron.* — 2020. — Vol. 65, № 11. P. 1331–1335.
12. Yushkov K.B. et al. Optimization of noncollinear AOTF design for laser beam shaping // *Appl. Opt.* — 2020. — Vol. 59, № 28. P. 8575.
13. Obydenov D.V., Yushkov K.B., Molchanov V.Ya. Ring-shaped optical trap based on an acousto-optic tunable spatial filter // *Opt. Lett.* — 2021. — Vol. 46, № 18. P. 4494.
14. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. Москва: Мир, — 1987. 676 с.
15. Suhre D.R., Denes L.J., Gupta N. Telecentric confocal optics for aberration correction of acousto-optic tunable filters // *Appl. Opt.* — 2004. — Vol. 43, № 6. P. 1255.