

Оптический журнал

Оптическое приборостроение и метрология
Optical instrument making and metrology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-11-62-70

УДК 681.785.5

Унифицированная оптическая схема акустооптического видеоспектрометра видимого диапазона спектра

Михаил Петрович Поляков¹✉, Владислав Игоревич Батшев²,
Александр Сергеевич Мачихин³, Витольд Эдуардович Пожар⁴

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

¹polyakov.mp@ntcup.ru <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>

²batshев.vi@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

³machikhin@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>

⁴vitold@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

Аннотация

Предмет исследования. Методы проектирования унифицированных оптических схем акустооптических видеоспектрометров различного назначения. **Цель работы.** Создание унифицированной оптической схемы, работающей как с одиночным, так и с двойным акустооптическим монохроматором, без снижения качества изображения. **Метод.** Представленный метод проектирования оптических схем акустооптических видеоспектрометров состоит из двух этапов: формирование в системе автоматизированного проектирования оптических схем особых мультиконфигурационных и оптимизационных параметров для расчета оптической схемы и последующей пространственно-спектральной калибровки готового акустооптического видеоспектрометра. **Основные результаты.** Представлен малогабаритный реконфигурируемый видеоспектрометр видимого диапазона спектра с акустооптическим монохроматором в параллельных пучках апертурных лучей. Особенностью данного прибора является унифицированная оптическая схема, которая может работать как с одиночным, так и с двойным акустооптическим монохроматором. Описаны этапы проектирования акустооптического видеоспектрометра, указаны особенности расчета унифицированной оптической схемы. Проведен анализ рассчитанной унифицированной оптической схемы. Оценено качество изображения оптической схемы для двух ее конфигураций. Проведено сравнение конфигураций унифицированной оптической схемы с двукратной и однократной монохроматизацией. Показано, что одиночный акустооптический монохроматор может работать в увеличенном угловом поле с предварительно проведенной специализированной пространственно-спектральной калибровкой. Приведены особенности данных конфигураций акустооптического видеоспектрометра и возможности их применения в реализации спектральных приборов для решения различных прикладных задач. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы при проектировании унифицированных оптических схем, пригодных для использования как с одиночными, так и с двойными акустооптическими монохроматорами без снижения качества изображения.

Ключевые слова: акустооптический перестраиваемый фильтр, видеоспектрометр, качество изображения, светосила, угловое поле

Благодарность: результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН. Работа выполнена в рамках Государственного задания «Разработка новых акустооптических методов и приборов» (FFNS-2022-0010).

Ссылка для цитирования: Поляков М.П., Батшев В.И., Мачихин А.С., Пожар В.Э. Унифицированная оптическая схема акустооптического видеоспектрометра видимого диапазона спектра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 62–70. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-62-70>

Коды OCIS: 230.1040, 220.3620

Unified optical scheme of acousto-optical imaging spectrometer for visible range of spectrum

MIKHAIL P. POLIAKOV¹✉, VLADISLAV I. BATSHEV²,
ALEXANDER S. MACHIKHIN³, VITOLD E. POZHAR⁴

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

¹polyakov.mp@ntcup.ru <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>

²batshev.vi@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

³machikhin@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>

⁴vitold@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

Abstract

Subject of study. Methods for designing unified optical schemes of acousto-optical imaging spectrometers for various purposes. **Aim of study.** Creation of a unified optical scheme that works with both single and double acousto-optical monochromators without declining image quality. **Method.** The presented method for designing optical schemes of acousto-optical imaging spectrometers consists of two stages: the formation special multiconfiguration and optimization parameters in the computer-aided design of optical schemes for calculating the optical scheme and subsequent spatial-spectral calibration of the finished acousto-optical imaging spectrometer. **Main results.** A small-sized reconfigurable imaging spectrometer in the visible range of spectrum with an acousto-optical monochromator in parallel beams of aperture rays is presented. A feature of this device is a unified optical scheme that can work with both a single and a double acousto-optical monochromator. The stages of designing the acousto-optical imaging spectrometer are described, and the features of calculating the unified optical scheme are indicated. The analysis of the calculated unified optical scheme is carried out. The image quality of the optical scheme is estimated for two configurations. The configurations of the unified optical scheme with double and single monochromatization are compared. It is shown that the single acousto-optical monochromator can operate in an enlarged angular field of view with a preliminary specialized spatial-spectral calibration. The features of these configurations of the acousto-optical imaging spectrometer and the possibility of their application in the implementation of spectral instruments for solving various applied problems are presented. **Practical significance.** The results of the work can be used in the design of unified optical schemes suitable for use with both single and double acousto-optic monochromators without declining image quality.

Keywords: acousto-optical tunable filter, imaging spectrometer, image quality, luminosity, angular field of view

Acknowledgment: the results of the work were obtained using the equipment of the Center for Collective Use of the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS. The work was carried out within the framework of the State Assignment "Development of new acousto-optical methods and devices" (FFNS-2022-0010).

For citation: Poliakov M.P., Batshev V.I., Machikhin A.S., Pozhar V.E. Unified optical scheme of acousto-optical imaging spectrometer for visible range of spectrum [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. P. 62–70. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-62-70>

OCIS codes: 230.1040, 220.3620

ВВЕДЕНИЕ

Методы гиперспектральной съемки широко используются для дистанционного зондирования, экомониторинга, неразрушающего контроля и решения многих других задач [1–5]. Одними из наиболее перспективных технических решений при создании гиперспектральных приборов являются акустооптические (АО) перестраиваемые фильтры (АОПФ). Видеоспектрометры на их основе обладают рядом полезных свойств: произвольной спектральной адресацией, возможностью управления формой спектральных каналов, высоким пространственным разрешением, отсутствием подвижных элементов, возможностью селекции излучения по поляризации и др. [6, 7].

Современные направления спектрального анализа требуют от приборов высокой производительности и многофункциональности при минимизации габаритных размеров, массы, энергопотребления и стоимости. В АО спектральных приборах элементом, в значительной степени определяющим их возможности, является АОПФ. Для каждой прикладной задачи оптическая схема проектируется под конкретный АОПФ исходя из его параметров, поэтому сложно создать универсальную оптическую схему.

Акустооптические перестраиваемые фильтры имеют сравнительно небольшие световой размер и угловую апертуру, а также сравнительно невысокое спектральное разрешение. Эти факторы ограничивают основные характеристики АО спектральных приборов. Однако существуют методы преодоления указанных ограничений. Для повышения спектрального разрешения и устранения влияния дисторсии и хроматического сдвига на качество изображения применяют двойную АО фильтрацию [7].

Повышение светосилы прибора возможно на основе исследований, приведенных в работе [8], в которой показано, что при увеличении диапазона углов падения излучения на АОПФ (угловой апертуры) в отфильтрованном спектральном изображении центральная длина волн излучения монотонно меняется от центра к краю поля зрения. Следовательно, при проведении соответствующей пространственно-спектральной калибровки АОПФ можно создавать АО спектральные приборы с расширенным полем зрения и увеличенной светосилой.

Целью работы, результаты которой представлены в статье, является создание унифицированной оптической схемы, работающей как с одиночным, так и с двойным АО монохроматором, без снижения качества изображения.

В настоящей статье описана универсальная оптическая система видеоспектрометра, в которой может быть использована двойная АО фильтрация для повышения спектрального разрешения, а также в случае использования одиночного АО фильтра может быть увеличено поле зрения ОС с применением методики [8].

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА

Акустооптические видеоспектрометры являются сложными оптико-электронными приборами. В устройствах такого типа основную функцию, а именно построение изображения с заданными пространственно-спектральными характеристиками, выполняет оптическая система (ОС). Зачастую ее расчет занимает большую часть времени проектирования АО видеоспектрометра, а учитывая особенности АОПФ, каждый раз приходится создавать особую ОС видеоспектрометра для новой прикладной задачи. Поэтому актуальна разработка унифицированной ОС, способной работать как с одиночным, так и с двойным АО монохроматором и с матричными приемниками излучения (МПИ) различных размеров. В этом случае, при одинаковой светосиле, для одиночного и двойного АО монохроматоров можно получить разные угловые поля, используя разные МПИ.

В данной работе представлен малогабаритный реконфигурируемый АО видеоспектрометр видимого диапазона спектра (450–850 нм) с АОПФ, расположенным в параллельных пучках апертурных лучей. Оптическая схема данного АО видеоспектрометра рассчитана так, чтобы она могла работать без снижения качества изображения как с одиночным, так и с двойным АО монохроматором без существенных изменений в конструкции АО прибора.

Габаритный расчет

Расчет оптической схемы проводился для АОПФ на основе кристалла парателлурита

с типичными параметрами, требуемыми для АО видеоспектрометров видимого диапазона: световые размеры оптических граней 9×9 мм, расчетная угловая апертура $\sigma_A = 2,5^\circ$, ширина выделяемой спектральной линии около 4 нм на длине волны 633 нм.

Указанные параметры АОПФ накладывают существенные ограничения на расчет ОС, поскольку любая ОС подчиняется теореме Штраубеля. Довольно точным приближением требований этой теоремы для ОС с угловыми полями до 60° является инвариант Лагранжа–Гельмгольца [9]

$$nA\sin\omega = n'A'\sin\omega', \quad (1)$$

где n и n' — показатели преломления в пространстве предметов и изображений соответственно, A и A' — половины диаметров входного и выходного зрачков ОС соответственно, $\sin\omega$ и $\sin\omega'$ — синусы угловых полей в пространстве предметов и изображений соответственно.

Как правило АОПФ располагают в выходном зрачке ОС для минимизации габаритов пучков на входной и выходной оптических гранях АОПФ. Таким образом, анализируя уравнение (1) можно сделать вывод, что невозможно получить АО видеоспектрометр, обладающий высокой светосилой и большим угловым полем одновременно. При этом, как показано в работе [8], увеличение угловой апертуры АОПФ приводит к спектральным искажениям, которые возможно откалибровать в готовом видеоспектрометре. Это позволяет создать ОС АО видеоспектрометра, обеспечивающую одновременно и увеличенную светосилу, и увеличенное эффективное угловое поле.

Для минимизации габаритных размеров и массы АО видеоспектрометра на входе (перед АО монохроматором) установлена телескопическая система Галилея, а на выходе (за АО монохроматором) размещен выходной объектив с ходом лучей в пространстве изображений, близким к телесентрическому (отклонение не превышает $0,8^\circ$), что обеспечивает высокую равномерность освещенности в изображении, малые кривизну поля и дисторсию, а также меньшую чувствительность к дефокусировкам, вызванным термоаберрациями [10, 11].

Учитывая выбранные структурные и функциональные особенности АО видеоспектрометра, можно определить габаритные параметры ОС и осуществить последующие аберрационную коррекцию и оптимизацию в системе автоматизированного проектирования (САПР) ZEMAX

$$\Gamma_T = -f'_1/f'_2 = D/D', \quad (2)$$

где Γ_T — увеличение телескопической системы Галилея, f'_1 — фокусное расстояние окуляра, f'_2 — фокусное расстояние объектива,

$$L = f'_1 + f'_2, \quad (3)$$

L — длина системы Галилея.

В результате расчетов по формулам (2), (3) были определены фокусные расстояния объектива $f'_2 = 200$ мм и окуляра $f'_1 = -80$ мм системы Галилея.

Оптимизация оптической системы в системе автоматизированного проектирования ZEMAX

При аберрационной коррекции ОС видеоспектральных устройств важно не только минимизировать аберрации на отдельных длинах волн, но и контролировать хроматизм положения и увеличения. Хроматизм положения не должен приводить к существенному увеличению пятен рассеяния, иначе при сканировании по спектру придется перефокусировать ОС, что крайне неудобно и к тому же замедляет и усложняет работу АО видеоспектрометра. Хроматизм увеличения менее критичен, поскольку при небольших значениях (в пределах 10 пикселов в случае мегапиксельных МПИ 1000×1000 элементов и более) он может быть устранен программно без потери информации и качества изображения и без ухудшения регистрируемых спектральных характеристик. Однако для этого необходима соответствующая калибровка системы, что требует дополнительное стендовое оборудование, а потому предпочтительнее устраниить этот тип аберраций при расчете ОС.

Математическое моделирование унифицированной ОС даже с использованием САПР является весьма трудоемкой задачей. Чтобы учесть пространственно-спектральные искажения, вносимые АОПФ, и приблизить расчет к реальности, использовалась оригинальная

математическая модель АОПФ, описывающая его как оптический компонент с известными аберрационными свойствами [12]. В результате предварительного моделирования было установлено, что одиночный АО монохроматор, в отличие от двойного, создает некоторые пространственно-спектральные искажения, которые невозможно полностью компенсировать другими элементами ОС, в частности спектральный дрейф, который представляет собой смещение и изменение масштаба изображения, зависящие от выделяемой длины волны. Поэтому не представляется возможным провести аберрационную коррекцию ОС для обеих конфигураций в одной модели ОС. Для разрешения данной проблемы в САПР ZEMAX была задана мультиконфигурационная модель ОС, включающая в себя конфигурации с одиночным и двойным АО монохроматорами. Для каждой конфигурации была задана своя оптимизационная функция. Основное отличие оптимизационных функций было в игнорировании коррекции хроматизма

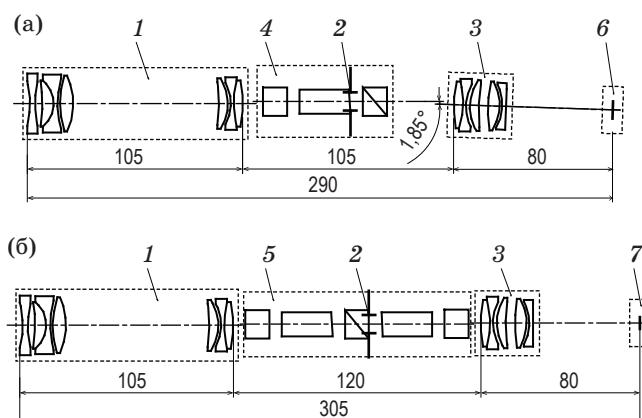


Рис. 1. Оптические схемы видеоспектрометра с одиночным (а) и двойным (б) АО монохроматорами. 1 — система Галилея, 2 — апертурная диафрагма, 3 — выходной объектив, 4 — одиночный АО монохроматор, 5 — двойной АО монохроматор, 6 — цифровая камера с МПИ размером 8,45×7,07 мм, 7 — цифровая камера с МПИ размером 5,3×4,28 мм

Fig. 1. Optical schemes of imaging spectrometer with (a) single and (b) double acousto-optic monochromators. (1) Galilean system, (2) aperture stop, (3) output lens, (4) single acousto-optic monochromator, (5) double acousto-optic monochromator, (6) digital camera with image sensor's dimensions 8.45×7.07 mm, (7) digital camera with image sensor's dimensions 5.3×4.28 mm

увеличения для конфигурации с одиночным АО монохроматором, так как его спектральный дрейф не поддается коррекции расчетом ОС.

В результате одновременной оптимизации обеих конфигураций удалось получить ОС (рис. 1), которая идентична для одиночного и двойного АО монохроматоров. Спроектированная ОС в обеих конфигурациях имеет высокое качество изображения, используя при расчете всего 9 линз в 7 группах (три линзы из системы Галилея унифицированы в выходном объективе) и стекла трех марок (СТК3, ТК21 и ОФ4). Кроме того, при рабочем расстоянии съемки от 0,5 м до бесконечности в ОС обеих конфигураций сохраняется качество изображения.

АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА

Проанализируем и сравним основные характеристики качества изображения спроектированной ОС в конфигурациях с одиночным и двойным АО монохроматорами.

В конфигурации с двойным АО монохроматором видеоспектрометр имеет высокое пространственное и спектральное разрешение. Это достигается тем, что АОПФ развернуты относительно друг друга на 180°, что в значительной степени устраняет вносимые фильтрами пространственно-спектральные искажения [13–15] и также немного сужает полосу пропускания [13, 15]. Угловое поле в данной конфигурации составляет 16° по диагонали кадра. Пространственное разрешение видеоспектрометра с двойным АО монохроматором можно оценить, используя расчетные модуляционные передаточные функции (рис. 2а) и характеристики пятен рассеяния (рис. 3а). Оно составляет порядка 500×400 элементов в пределах поля зрения.

В конфигурации с одиночным АО монохроматором видеоспектрометр имеет большее угловое поле (26° по диагонали кадра), но меньшее спектральное разрешение и худшее качество изображения из-за вносимых фильтром искажений. Оценка пространственного разрешения видеоспектрометра (рис. 2б, 3б, в) дает примерно 600×500 элементов в пределах поля зрения. Несмотря на то, что АОПФ выполнен по схеме с компенсацией спектрального дрейфа [16] в видимой и коротковолновой инфракрасной областях спектра, а пятна

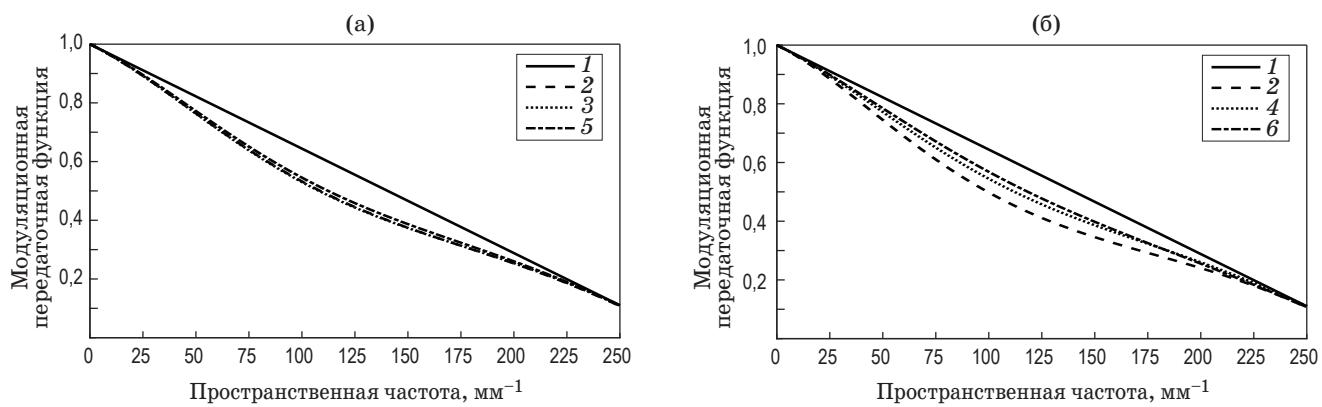


Рис. 2. Расчетные модуляционные передаточные функции видеоспектрометра с двойным (а) и одиночным (б) АО монохроматорами на длине волны 500 нм. 1 — дифракционный предел, 2 — поле (0; 0) мм, 3 — поле (2; 1,5) мм, 4 — поле (3; 2,5) мм, 5 — поле (2,85; 2,14) мм, 6 — поле (4,225; 3,535) мм

Fig. 2. Estimated modulation transfer functions of imaging spectrometer with (a) double and (b) single acousto-optical monochromators on wavelength 500 nm. (1) Diffraction limit, (2) field (0; 0) mm, (3) field (2; 1.5) mm, (4) field (3; 2.5) mm, (5) field (2.85; 2.14) mm, (6) field (4.225; 3.535) mm

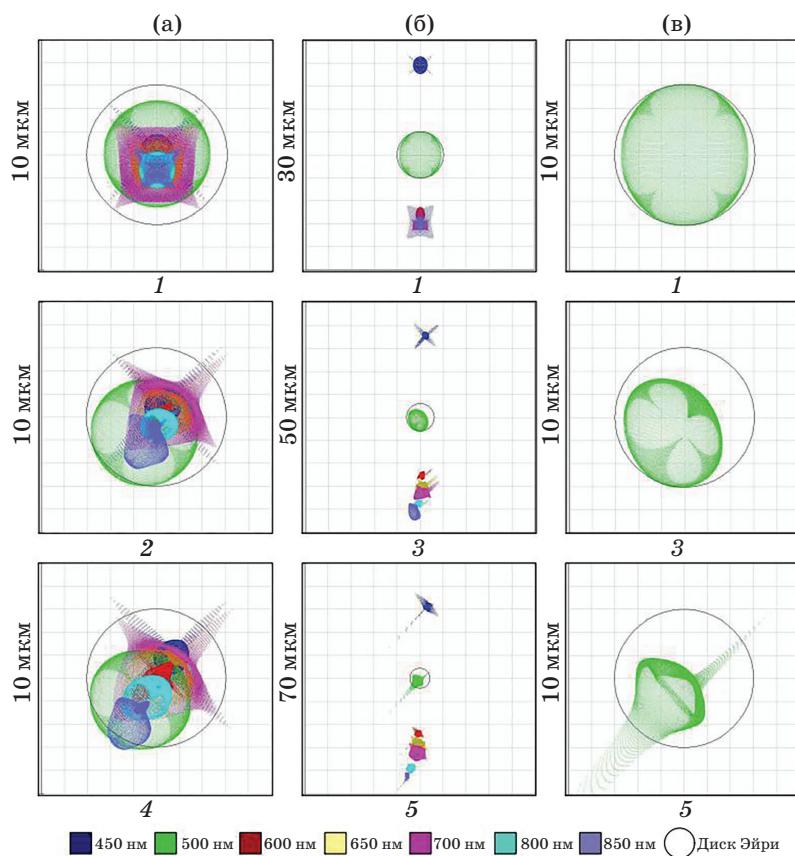


Рис. 3. Диаграммы полихроматических пятен рассеяния ОС с двойным (а) АО монохроматором, а также полихроматических (б) и монохроматических (в) пятен рассеяния ОС с одиночным АО монохроматором. 1 — поле (0; 0) мм, 2 — поле (2; 1,5) мм, 3 — поле (3; 2,5) мм, 4 — поле (2,85; 2,14) мм, 5 — поле (4,225; 3,535) мм

Fig. 3. Diagrams of polychromatic point spread functions of optical system with (a) double acousto-optical monochromator, also (b) polychromatic and (b) monochromatic point spread functions of optical system with single acousto-optical monochromator. (1) Field (0; 0) mm, (2) field (2; 1.5) mm, (3) field (3; 2.5) mm, (4) field (2.85; 2.14) mm, (5) field (4.225; 3.535) mm

Основные характеристики ОС
The main characteristics of the optical system

Конфигурация	Одиночный АО монохроматор	Двойной АО монохроматор
Угловое поле, град	16×20 (26 по диагонали кадра)	10×13 (16 по диагонали кадра)
Относительное отверстие	1:6,3	1:6,3
Ширина полосы пропускания на длине волны 633 нм, нм	4	2,8
Угловая апертура σ_A АОПФ, град	5	2,5
Размер входного зрачка, мм	3,5×3,5	3,5×3,5
Размер МПИ, мм	8,45×7,07	5,3×4,28
Количество разрешаемых элементов	600×500	500×400

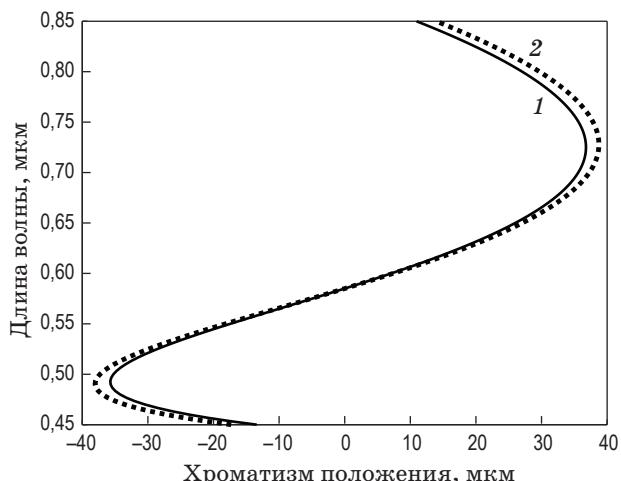


Рис. 4. Хроматизм положения ОС для конфигураций с одиночным (1) и двойным (2) АО монохроматорами

Fig. 4. Chromatic focal shift of optical system for configuration with (1) single and (2) double acousto-optical monochromators

рассеяния на каждой длине волны близки к дифракционным (рис. 3в), полихроматическое пятно рассеяния «расслоилось» и оказалось существенно больше дифракционного (рис. 3б). При этом хроматизм положения, как и в конфигурации с двойным АО монохроматором, оказался в пределах 75 мкм в рабочем спектральном диапазоне (рис. 4), а потому при перестройке по спектру не требуется перефокусировка ОС.

В конфигурации с одиночным АО монохроматором подразумевается использование спе-

циализированной пространственно-спектральной калибровки и последующей постобработки регистрируемых гиперспектральных изображений. Это связано с тем, что пучки лучей падают на АОПФ под углами, значительно большими, чем их расчетные значения (порядка 5 вместо 2,5°) и это приводит к существенной спектральной неоднородности по кадру [17]. Кроме того, при использовании одиночного АО монохроматора контраст изображения относительно невысок, а потому для устранения влияния фона необходимо измерять и вычитать «темновой» кадр, что приводит к уменьшению частоты кадров видеоспектрометра.

В таблице приведено сравнение основных характеристик ОС в конфигурациях с одиночным и двойным АО монохроматорами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе реализован подход к созданию унифицированных оптических схем АО видеоспектрометров. Рассчитанная ОС обеспечивает высокое качество изображения и может быть использована как с одиночным, так и с двойным АО монохроматором. Такой подход позволяет ускорить проектирование АО видеоспектрометров и снизить затраты на их изготовление за счет создания универсальной конструкции, подходящей для решения различных прикладных задач, не требующих высокого быстродействия, но накладывающих ограничения на габаритные размеры, массу и стоимость АО видеоспектрометров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chang C.-I. Hyperspectral data exploitation: Theory and applications. N.J.: John Wiley & Sons, 2007. 440 p.
2. Bei L., Dennis G.I., Miller H.M., et al. Acousto-optic tunable filters: Fundamentals and applications as applied to chemical analysis techniques // Progress in Quant. Electron. 2004. V. 28. № 2. P. 67–87. [https://doi.org/10.1016/S0079-6727\(03\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(03)00083-1)
3. Vo-Dinh T. A hyperspectral imaging system for in vivo optical diagnostics // IEEE Eng. in Medicine and Biology Magazine. 2004. V. 23. № 5. P. 40–49. <https://doi.org/10.1109/MEMB.2004.1360407>
4. Lorente D., Aleixos N., Gómez-Sanchís J., et al. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment // Food Bio-process Technol. 2012. V. 5. P. 1121–1142. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0725-1>
5. Chivukula V.S., Shur M.S., Ciplys D. Recent advances in application of acoustic, acousto-optic and photo-acoustic methods in biology and medicine // Physica Status Solidi (a). 2007. V. 204. № 10. P. 3209–3236. <https://doi.org/10.1002/pssa.200723313>
6. Pang Y., Zhang K., Lang L. Review of acousto-optic spectral systems and applications // Frontiers in Phys. 2022. V. 10. P. 1319. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1102996>
7. Мазур М.М., Судденок Ю.А., Шорин В.Н. Двойной акустооптический монохроматор изображений с перестраиваемой шириной аппаратной функции // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 4. С. 56–62.
8. Machikhin A.S., Gorevoy A.V., Martynov G.N., et al. Spatio-spectral transformation of non-collimated light beams diffracted by ultrasound in birefringent crystals // Photon. Res. 2021. V. 9. № 5. P. 687–693. <https://doi.org/10.1364/PRJ.417992>
9. Волосов Д.С., Цивкин М.В. Теория и расчет светооптических систем проекционных приборов. М.: Искусство, 1960. С. 143, 150.
10. Pate M.A. Optical design and specification of telecentric optical systems // Internat. Opt. Design Conf. 1998. V. 3482. P. 877–886. <https://doi.org/10.1117/12.322029>
11. Гебарт А.Я. Особенности проектирования некоторых типов особо-широкоугольных объективов // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 9. С. 17–21.
12. Мачихин А.С., Батшев В.И., Пожар В.Э. и др. Минимизация aberrаций акустооптического видеоспектрометра ближнего инфракрасного диапазона путем оптимизации параметров перестраиваемого фильтра // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 12. С. 59–64. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-12-59-64>
13. Champagne J., Kastelik J.-C., Samuel D., et al. Study of the spectral bandwidth of a double-pass acousto-optic system // Appl. Opt. 2018. V. 57. № 10. P. 49–55. <https://doi.org/10.1364/ao.57.000c49>
14. Gupta N., Suhre D.R. Effects of sidelobes on acousto-optic tunable filter imaging // Opt. Eng. 2017. V. 56. № 7. P. 073106. <https://doi.org/10.1117/1.oe.56.7.073106>
15. Wang P., Zhang Z. Double-filtering method based on two acousto-optic tunable filters for hyperspectral imaging application // Opt. Exp. 2016. V. 24. № 9. P. 9888–9895. <https://doi.org/10.1364/OE.24.009888>
16. Епихин В.М., Калинников Ю.К. Компенсация спектрального дрейфа угла дифракции неколлинеарного акустооптического фильтра // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 2. С. 160–163.
17. Machikhin A.S., Gorevoy A.V., Pozhar V.E., et al. Computational technique for field-of view expansion in AOTF-based imagers // Opt. Lett. 2022. V. 47. № 3. P. 585–588. <https://doi.org/10.1364/OL.438374>

REFERENCES

1. Chang C.-I. Hyperspectral data exploitation: Theory and applications. N.J.: John Wiley & Sons, 2007. 440 p.
2. Bei L., Dennis G.I., Miller H.M., et al. Acousto-optic tunable filters: Fundamentals and applications as applied to chemical analysis techniques // Progress in Quant. Electron. 2004. V. 28. № 2. P. 67–87. [https://doi.org/10.1016/S0079-6727\(03\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(03)00083-1)
3. Vo-Dinh T. A hyperspectral imaging system for in vivo optical diagnostics // IEEE Eng. in Medicine and Biology Magazine. 2004. V. 23. № 5. P. 40–49. <https://doi.org/10.1109/MEMB.2004.1360407>
4. Lorente D., Aleixos N., Gómez-Sanchís J., et al. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment // Food Bio-process Technol. 2012. V. 5. P. 1121–1142. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0725-1>
5. Chivukula V. S., Shur M. S., Ciplys D. Recent advances in application of acoustic, acousto-optic and photo-acoustic methods in biology and medicine // Physica Status Solidi (a). 2007. V. 204. № 10. P. 3209–3236. <https://doi.org/10.1002/pssa.200723313>
6. Pang Y., Zhang K., Lang L. Review of acousto-optic spectral systems and applications // Frontiers in Phys. 2022. V. 10. P. 1319. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1102996>
7. Mazur M.M., Suddenok Y.A., Shorin V.N. Double acousto-optic monochromator of images with tunable width of the transmission function // Technical Physics Letters. 2014. V. 40. № 2. P. 167–169. <https://doi.org/10.1134/S1063785014020254>
8. Machikhin A.S., Gorevoy A.V., Martynov G.N., et al. Spatio-spectral transformation of non-collimated light beams diffracted by ultrasound in birefringent crystals // Photon. Res. 2021. V. 9. № 5. P. 687–693. <https://doi.org/10.1364/PRJ.417992>
9. Volosov D.S., Tsivkin M.V. Theory and calculation of the light-optical systems of projection devices [in Russian]. Moscow: "Iskusstvo" Publ., 1960. P. 143, 150.
10. Pate M.A. Optical design and specification of telecentric optical systems // Internat. Opt. Design Conf. 1998. V. 3482. P. 877–886. <https://doi.org/10.1117/12.322029>
11. Gebhart A.Y. Design features of some types of ultra-wide-angle objectives // J. Opt. Technol. 2010. V. 77. № 9. P. 538–541. <https://doi.org/10.1364/JOT.77.000538>
12. Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E., et al. Minimizing aberrations of a near-infrared acousto-optic video spectrometer by optimizing the tunable filter parameters // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 12. P. 794–798. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000794>
13. Champagne J., Kastelik J.-C., Samuel D., et al. Study of the spectral bandwidth of a double-pass acousto-optic system // Appl. Opt. 2018. V. 57. № 10. P. 49–55. <https://doi.org/10.1364/ao.57.000c49>
14. Gupta N., Suhre D.R. Effects of sidelobes on acousto-optic tunable filter imaging // Opt. Eng. 2017. V. 56. № 7. P. 073106. <https://doi.org/10.1117/1.oe.56.7.073106>
15. Wang P., Zhang Z. Double-filtering method based on two acousto-optic tunable filters for hyperspectral imaging application // Opt. Exp. 2016. V. 24. № 9. P. 9888–9895. <https://doi.org/10.1364/OE.24.009888>
16. Epikhin V.M., Kalinnikov Yu.K. Compensation de la dérive spectrale de l'angle de diffraction dans un filtre acousto-optique non-collinéaire [in Russian] // Журнал технической физики. 1989. V. 59. № 2. P. 160–163. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=19782342>
17. Machikhin A.S., Gorevoy A.V., Pozhar V.E., et al. Computational technique for field-of view expansion in AOTF-based imagers // Opt. Lett. 2022. V. 47. № 3. P. 585–588. <https://doi.org/10.1364/OL.438374>

АВТОРЫ

Михаил Петрович Поляков — младший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>; polyakov.mp@ntcup.ru

Владислав Игоревич Батшев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; batshev.vi@ntcup.ru

Александр Сергеевич Мачихин — доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 23012533400; <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>; machikhin@ntcup.ru

Витольд Эдуардович Пожар — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; vitold@ntcup.ru

AUTHORS

Mikhail P. Poliakov — Junior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>; polyakov.mp@ntcup.ru

Vladislav I. Batshev — PhD (Engineering), Senior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; batshev.vi@ntcup.ru

Alexander S. Machikhin — Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 23012533400; <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>; machikhin@ntcup.ru

Vitold E. Pozhar — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Department Head, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; vitold@ntcup.ru

Статья поступила в редакцию 01.06.2023

Одобрена после рецензирования 01.08.2023

Принята к печати 26.09.2023

The article was submitted to the editorial office 01.06.2023

Approved after review 01.08.2023

Accepted for publication 26.09.2023