

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОЛИХРОМАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

И. М. Гулис*, А. Г. Купреев

УДК 681.785.554

Белорусский государственный университет,
220030, Минск, просп. Независимости, 4, Беларусь; e-mail: gulis@bsu.by

(Поступила 30 мая 2019)

Разработаны принципиальный подход и схемное решение для одновременной регистрации мультиспектральной информации на основе дисперсионного полихроматора с зеркальными объективами. Путем численного моделирования показано, что полуширина кружков рассеяния для 11 спектральных полос в диапазоне 400—700 нм для изображения точек в центре и на периферии поля объекта не превышает 15 мкм при фокусном расстоянии камерного зеркала 100 мм. Благодаря использованию простых оптических элементов схемное решение может послужить основой создания приборов невысокой стоимости для широкого круга приложений спектроскопии с пространственным разрешением.

Ключевые слова: мультиспектральная съемка, дисперсионный полихроматор изображения.

We have developed an approach and a design for the snapshot registration of multispectral information based on a dispersive polychromator with mirror objectives. By numerical simulation it is shown spot size for 11 spectral bands within 400—700 nm range when displaying the points in the center and on the periphery of the object field does not exceed 15 μm for a camera mirror with a focal length of 100 mm. Due to the use of simple optical elements, the schematic solution can serve as the basis for the creation of low-cost devices for a wide range of imaging spectroscopy applications.

Keywords: multispectral registration, dispersive imaging polychromator.

Введение. В спектроскопии с пространственным разрешением одним из распространенных способов формирования куба данных — зависимости интенсивности $I(x, y, \lambda)$ от координат изображения объекта x, y и длины волны излучения λ — является регистрация для множества точек изображения (x_i, y_i) множества спектров $I(x_i, y_i, \lambda)$ [1, 2]. Другой способ подразумевает регистрацию для набора относительно узких спектральных полос с центрами на λ_k набора “квазимонохроматических изображений” $I(x, y, \lambda_k)$ — так называемая мультиспектральная съемка [3]. Для многих практически значимых задач получение набора мультиспектральных изображений является более удобным способом анализа спектрально-пространственной информации об объекте. В самом простом варианте мультиспектральная съемка сводится к регистрации набора изображений через светофильтры [4]. Однако такой подход имеет ряд принципиальных ограничений, обусловленных неполным подавлением пропускания света за пределами номинально выделяемой отдельным светофильтром спектральной полосы. Указанный недостаток становится еще большим препятствием для получения надежной спектрально-пространственной информации по мере уменьшения ширин выделяемых светофильтром полос (повышения спектрального разрешения): интегральное по спектру фоновое пропускание может быть сопоставимым со спектральным пропусканием в пределах узкой выделяемой полосы (или даже превышать его). В связи с этим представляют несомненный интерес решения, основанные на дифракционной спектральной фильтрации, которые способны обеспечить более высокое спектральное разрешение и эффективное подавление фона. Такие дисперсионные приборы могут быть названы моно-

OPTICAL DESIGN OF IMAGE POLYCHROMATOR FOR IMAGING SPECTROSCOPY

I. M. Gulis*, A. G. Kupreyeu (Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220030, Belarus; e-mail: gulis@bsu.by)

хроматорами изображения. Мультиспектральная съемка сводится в этом случае к последовательной регистрации изображений для набора λ_k , выделенных при перестройке монохроматора. Принципиально новые возможности открывает активно разрабатываемый в настоящее время подход, ориентированный на регистрацию всего куба данных $I(x, y, \lambda)$ в одном акте измерения (snapshot hyperspectroscopy) [5]. Кроме очевидного выигрыша в оперативности (малое время получения куба данных) такой подход позволяет регистрировать $I(x, y, \lambda)$ и для широкого класса нестационарных объектов.

Дисперсионный прибор, позволяющий в одном акте измерения регистрировать набор квази-монохроматических изображений, уместно назвать полихроматором изображения. Некоторые концептуальные предложения по схемной архитектуре и прототипы разработаны, например, в [6]. В то же время, очевидно, что для реализации работоспособного прибора требуется решить задачу формирования набора изображений для выделяемых спектральных полос с минимальными абберационными искажениями и оптимальной фокусировкой для всех точек поля на фотоприемнике.

В настоящей работе предложена оптическая схема полихроматора изображения, выполнен анализ качества изображения, формируемого прибором.

Расчет оптической системы. В оптической схеме (рис. 1) использована зеркальная оптика, что исключает хроматическую абберацию, а также позволяет осуществлять регистрацию в спектральных диапазонах от УФ до ИК. Схема ориентирована на работу в коллимированных пучках (с бесконечно удаленным объектом), однако с помощью дополнительной входной оптики может быть адаптирована для работы с объектами, расположенными на произвольных расстояниях от входной апертуры.

Особенностью схемы является расположение дифракционной решетки D на расстоянии L от коллиматорного объектива M_{col} , равном фокусному расстоянию f_{col} этого объектива, поэтому объектив M_{col} формирует изображение бесконечно удаленного объекта вблизи поверхности дифракционной решетки D . Далее схема спектрографа строится как сферическая: центр сферического зеркала (камерного объектива M_{cam}) совпадает с центром решетки D [7].

Система элементов, включающая в себя входную щель S , коллиматорное зеркало M_{col} , находящееся от нее на расстоянии f_{col} , дифракционную решетку D , камерное зеркало M_{cam} и щель (например, S_{blue}), лежащую на расстоянии f_{cam} от камерного зеркала, выполняет функцию монохроматора, настроенного на длину волны λ_k , для всех пучков, входящих в S . Изображение бесконечно удаленных объектов на дифракционной решетке обозначено $1'$ и $2'$. Сферическое камерное зеркало M_{cam} , распо-

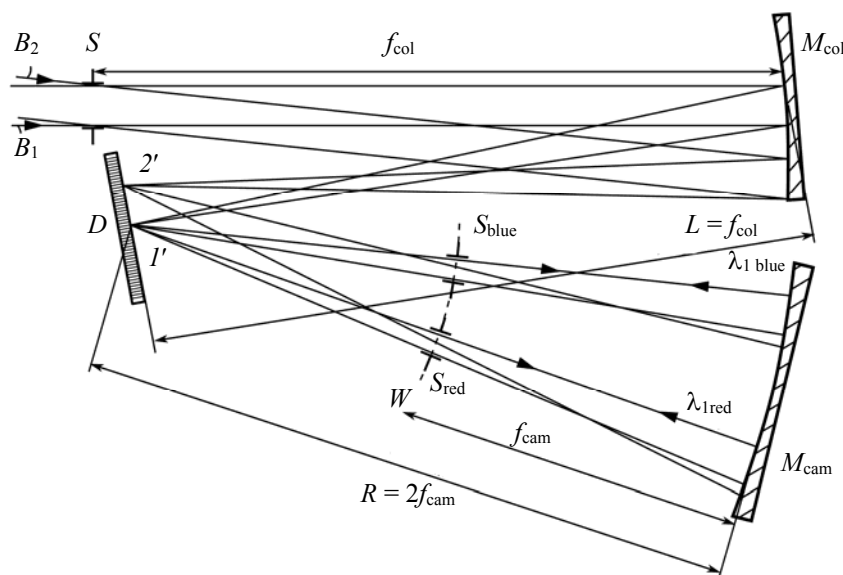


Рис. 1. Принципиальная схема полихроматора изображения: S — входная апертура; B_1 и B_2 — пучки от центра и края поля; M_{col} — коллиматорное зеркало с фокусным расстоянием f_{col} ; D — дифракционная решетка; M_{cam} — камерное зеркало с фокусным расстоянием f_{cam} ; S_{blue} и S_{red} — щели для пространственной фильтрации хроматических пучков с условными длинами волн λ_{blue} и λ_{red} ; $1'$ и $2'$ — точки вблизи поверхности дифракционной решетки D , в которых фокусируются пучки B_1 и B_2 ; W — фокальная поверхность зеркала M_{cam} ; плоскость дисперсии параллельна плоскости рисунка

женное на расстоянии $R = 2f_{\text{cam}}$ от дифракционной решетки, переизображает эту картину в область дифракционной решетки со спектральной фильтрацией, определяемой щелью S на фокальной поверхности W объектива M_{cam} . Таким образом, система может рассматриваться как монохроматор изображения. Размещение на W нескольких щелей ($S_{\text{blue}}, \dots, S_{\text{red}}$) позволяет получить изображение в наборе спектральных полос, отвечающих различным λ_k . Разделение пучков, идущих в направлении M_{cam} и отраженных от него и идущих на детектор, осуществляется наклоном зеркала M_{cam} на небольшой угол в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии. Чтобы внесенные при таком наклоне aberrации были минимальными, угол наклона M_{cam} также должен быть минимальным. Отметим, что M_{cam} выполняет функцию камерного объектива, обеспечивающего спектральную селекцию, и он же формирует узкополосные изображения.

Для реализации полихроматора изображения — устройства, позволяющего зарегистрировать набор изображений, отвечающих различным λ_k , — необходимо пространственно разделить эти изображения. Для этого вместо щелей $S_{\text{blue}}, \dots, S_{\text{red}}$ используется набор зеркал, наклон каждого из которых задает направление на отдельную матрицу фотоприемника (совместить их на одном детекторе не представляется возможным из-за наклона нормали дифракционной решетки по отношению к оптическим осям дифрагированных пучков).

На основе указанного подхода разработана оптическая схема мультиспектрального полихроматора (рис. 2). Входная апертура I представляет собой круглое отверстие диаметром 3 мм. Радиус коллиматорного зеркала 400 мм, радиус камерного 200 мм (фокусное расстояние 200 и 100 мм). Дифракционная решетка 1200 штр/мм работает в -1 порядке и перпендикулярна оптической оси на участке до решетки. Угол наклона камерного зеркала $\alpha/2 = 1.6^\circ$. Наклон зеркал b выбран таким образом, чтобы они отклоняли изображающие пучки в направлении x (вниз) под углами, близкими к нормали к плоскости дисперсии; 11 зеркал b имеют квадратную форму и размер 3×3 мм, обеспечивая формирование 11 спектральных полос (интервал между центрами полос 30 нм) в диапазоне 400—700 нм. Зеркала наклонены таким образом, чтобы пространственно разнести соответствующие детекторы 3 , которые имеют индивидуальный наклон для обеспечения оптимальной фокусировки для всего поля. При угловом размере поля зрения 2.3° в направлениях $(X;0)-(-X;0)$, $(0;Y)-(0;-Y)$ ($|X|=|Y|$) и 3.2° в направлениях $(X;Y)-(-X;-Y)$, $(-X;Y)-(X;-Y)$ (рис. 2, в) размер изображения на детекторах $\sim 8.5 \times 8.5$ мм.

Результаты и их обсуждение. В программе ZEMAX® проведено моделирование кружков рассеяния в режиме непоследовательной трассировки. Полуширина пятен рассеяния оценивалась по уровню половинной интенсивности в системе координат, соответствующих отображению на детектор координат входного поля (рис. 2, а и в). Результаты приведены в табл. 1. Как видно, полуширина пятен рассеяния не превышает 15 мкм, что свидетельствует о приемлемом качестве изображения. Оценка числа разрешаемых пространственных элементов $> 1.2 \times 10^6$. При указанных параметрах дифракционной решетки угол между осями пучков $\lambda = 400$ и 700 нм составляет $\sim 28.4^\circ$, что позволяет оценить ширину полосы пропускания полихроматора $\Delta\lambda_k \approx 18$ нм (варьируется по спектру). Вариацией размеров щелей и дисперсии решетки можно реализовать иные спектральные диапазоны, числа спектральных полос и $\Delta\lambda_k$.

Т а б л и ц а 1. Полуширина пятен рассеяния для точек поля объекта (рис. 2, в) в координатах x и y (x/y), мкм

λ , нм	(0;0)	(0;Y)	(0;-Y)	(X;0)	(-X;0)	(X;Y)	(X;-Y)	(-X;Y)	(-X;-Y)
400	3/3	4/8	4/4	13/5	4/2	15/12	12/7	6/5	5/3
430	2/2	4/6	5/5	7/4	2/6	8/8	11/5	3/9	4/8
460	3/4	7/4	9/10	7/2	2/6	7/8	14/8	7/4	5/13
490	3/5	5/8	6/7	8/2	2/8	9/8	11/5	3/12	5/10
520	2/2	8/4	6/7	6/4	2/4	7/10	11/6	9/3	4/10
550	1/3	5/8	4/5	6/4	2/8	8/8	11/5	4/13	3/9
580	2/4	6/6	7/9	7/4	2/11	7/8	11/5	6/11	6/15
610	2/2	8/4	4/5	9/3	5/2	8/8	13/7	12/1	3/4
640	2/2	8/5	5/7	5/7	3/8	7/9	10/6	8/11	12/7
670	2/2	9/4	6/8	5/6	3/8	7/11	11/5	10/6	4/14
700	3/2	9/4	4/5	3/9	3/10	8/12	10/7	9/11	4/13

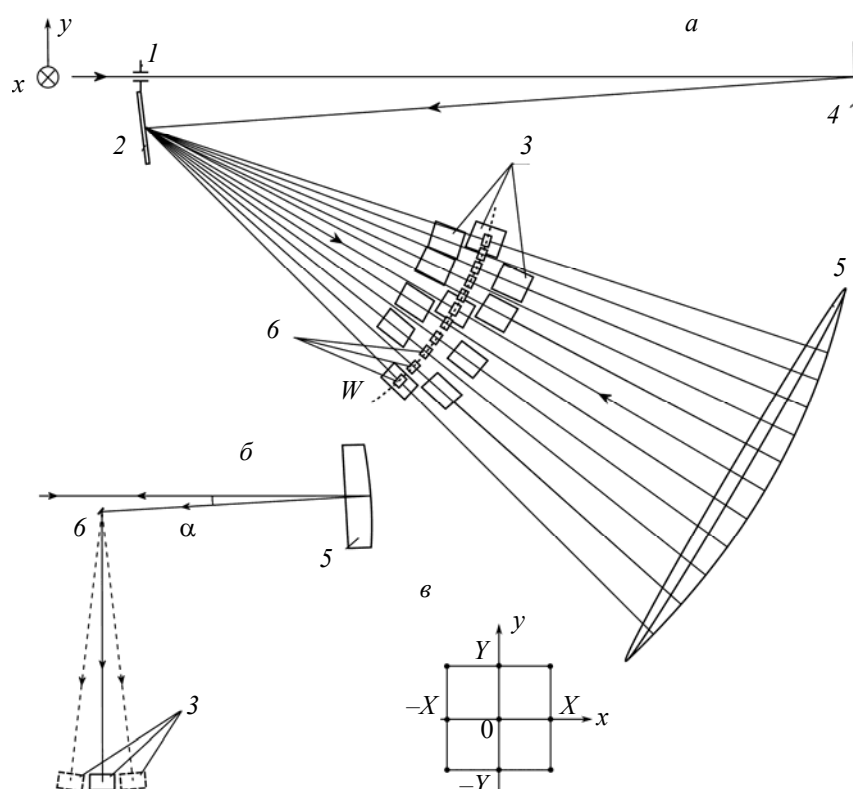


Рис. 2. Оптическая схема полихроматора изображения: *a* — вид сверху, *б* — схематичное прохождение осевого луча пучка с $\lambda = 550$ нм (штриховая линия — прохождение осевых лучей пучков 520 и 580 нм, а также соответствующие детекторы), *в* — точки поля объекта, для которых проводился анализ пятен рассеяния (система координат соответствует рис. 2, *a*); 1 — входная апертура, 2 — дифракционная решетка, 3 — детекторы для регистрации отдельных спектральных полос (на рис. 2, *б* показаны частично), 4 — коллиматорное зеркало, 5 — камерное зеркало, 6 — зеркала — функциональные аналоги щелей (на рис. 2, *б* показано одно), α — угол выхода из плоскости дисперсии; стрелки показывают распространение осевых лучей хроматических пучков; *W* — фокальная поверхность объектива 5

Заключение. На основе предложенного принципиального подхода к реализации полихроматора изображения разработано схемное решение прибора с шириной полосы пропускания $\Delta\lambda \approx 18$ нм и числом разрешаемых пространственных элементов $\geq 1.2 \times 10^6$. Оптическая система с зеркальными элементами обеспечивает ахроматичность в широком спектральном диапазоне. Простые оптические элементы позволяют реализовать технологичные в изготовлении приборы для широкого круга приложений спектроскопии с пространственным разрешением. В частности, указанные аналитические характеристики пригодны для приложений в медицине, биологии, дистанционном зондировании.

[1] P. Mouroulis, R. O. Green, T. G. Chrien. *Appl. Opt.*, **39**, N 13 (2000) 2210—2220

[2] Е. С. Воропай, И. М. Гулис, А. Г. Купреев, К. Н. Каплевский, А. Г. Костюкевич, А. Е. Радько, К. А. Шевченко. *Журн. прикл. спектр.*, **77**, № 2 (2010) 305—312 [E. S. Voropay, I. M. Gulis, A. G. Kupreyev, K. N. Kaplevsky, A. G. Kastsiukevich, A. E. Radko, K. A. Shevchenko. *J. Appl. Spectr.*, **77** (2010) 285—292]

[3] G. Lu, B. Fei. *J. Biomed. Opt.*, **19**, N 1 (2014) 010901(1—23)

[4] N. Gat. *Proc. SPIE*, **4056** (2000) 50—64

[5] N. Hagen, M. W. Kudenov. *Opt. Eng.*, **52**, N 9 (2013) 090901(1—23)

[6] K. Hashimoto, H. Mizuno, K. Nakagawa, R. Horisaki, A. Iwasaki, F. Kannari, I. Sakuma, K. Goda. *Opt. Lett.*, **39**, N 24 (2014) 6942—6945

[7] К. И. Тарасов. *Спектральные приборы*, 2-е изд., Ленинград, Машиностроение (1977) 118—120