

22 °С с помощью медных держателей, а для улучшения теплового контакта использовалась индиевая фольга. Торцевые поверхности кристаллов были покрыты просветляющим покрытием на длинах волн накачки и лазерной генерации.

Выходные характеристики Yb:GYSO лазеров, вырезанных вдоль осей оптических индикатрис N_p , N_m и N_g , представлены на рисунке 2.

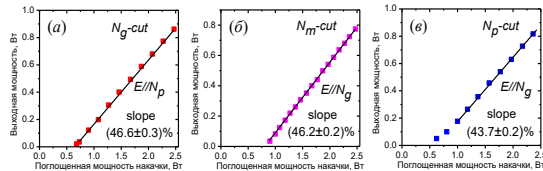


Рисунок 2 – Выходные характеристики Yb:GYSO лазера

Все зависимости линейны, без признаков резкого падения выходной мощности. Лазер работал в режиме TEM₀₀ для всех ориентаций кристалла. Таким образом, для кристаллов вырезанных вдоль осей оптических индикатрис N_p и N_m было получено выходное излучение с поляризацией $E//N_g$, в случае кристалла вырезанных вдоль оси N_g наблюдалось выходное излучение с поляризацией $E//N_p$. Лазер работал на длине волны около 1090 нм для обеих поляризаций. Дифференциальная эффективность составляет 46,6 %, 46,2 % и 43,7 % для кристаллов, вырезанных вдоль осей N_g , N_m и N_p соответственно.

Зависимость диаметра выходного пучка от поглощенной мощности накачки для Yb:GYSO-лазера представлена на рисунках 3, а–в для трех рассматриваемых направлений распространения света в кристалле Yb:GYSO. Здесь точки представляют измеренные диаметры выходного пучка, а кривые – их моделирование на основе метода ABCD. Для всех трех ориентаций кристалла увеличение мощности накачки приводит к уширению лазерного пучка в двух измеренных направлениях. Плоскопараллельный резонатор может быть устойчив только при положительном значении тепловой линзы, фокусное расстояние которой определялось в соответствии с методом ABCD. Термолинза в кристаллах Yb:GYSO положительна для всех ориентаций кристаллов, использованных в исследовании. Измеренные значения оптической силы термолинзы D представлены на рисунке 3, г–е.

Линейная аппроксимация оптической мощности поглощенной мощностью накачки P_{abs}

позволяет определить коэффициент чувствительности M . Минимальный коэффициент чувствительности M был получен для кристалла Yb:GYSO вырезанных вдоль оси N_p , со значениями 2,6 (мВт)⁻¹ и 1,3 (мВт)⁻¹ для направлений вдоль N_m и N_g соответственно (таблица 1). Для кристалла Yb:GYSO вырезанного вдоль оси N_m наблюдался минимальный астигматизм $S = |MN_g - MN_p| - 0,2$.

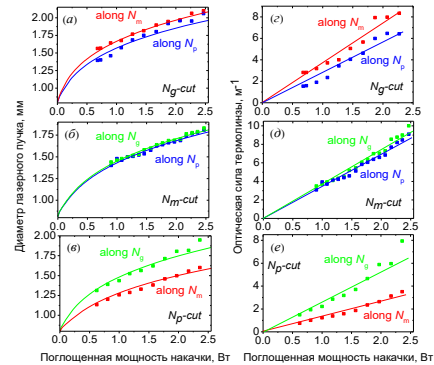


Рисунок 3 – Размер выходного пучка Yb:GYSO-лазера (а–в), оптическая сила термолинзы в Yb:GYSO лазере (г–е)

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что кристалл вырезанный вдоль оси N_m является наиболее предпочтительным для мощных лазерных систем на основе кристалла Yb³⁺:GYSO, поскольку он имеет малый астигматизм тепловой линзы активного элемента и не будет ограничивать выходную мощность лазера при высоких уровнях накачки.

Таблица 1 – Коэффициенты чувствительности M и степень астигматизма S для кристалла Yb:GYSO

Вырезка кристалла	Поляризация выходного излучения	M -фактор, м ⁻¹ Вт ⁻¹	Астигматизм S , %
Вырезка вдоль N_g	$E//N_p$	3,7 ($//N_m$)	24
	$E//N_g$	2,8 ($//N_p$)	
Вырезка вдоль N_m	$E//N_g$	3,7 ($//N_m$)	5.4
	$E//N_p$	3,5 ($//N_p$)	
Вырезка вдоль N_p	$E//N_g$	1,3 ($//N_m$)	54
	$E//N_p$	2,8 ($//N_g$)	

Литература

1. Optical and laser properties of Yb:Y₂SiO₅ single crystals and discussion of the figure of merit relevant to compare ytterbium-doped laser materials / R. Gaume [et al.] // Optical Materials. – 2002. – Vol. 19, № 1. – P. 81–88.

УДК 681.785.554

РАЗРАБОТКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛЕТНОЙ СИСТЕМЫ (ГАЛС) НА ОСНОВЕ СПЕКТРОМЕТРА ОФФНЕРА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА С БОРТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Литвиневич Г. С., Ломако А. А., Ивуть П. В., Хомицевич А. Д.

НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ», Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлена разработка гиперспектральной автоматизированной летной системы (ГАЛС) для дистанционного зондирования Земли с борта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Описаны технические требования и оптическая схема на основе компактного спектрометра Оффнера. Рассчитанные параметры системы подтверждают ее способность обеспечивать более 100 спектральных каналов и пространственное разрешение в 1 м в диапазоне 400–900 нм при поле зрения 28°. Бортовая обработка данных позволяет значительно сократить время между сбором информации и получением готовых результатов, что критически важно для оперативного мониторинга.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, беспилотный летательный аппарат, дистанционное зондирование Земли, спектрометр Оффнера, бортовая обработка данных.

DEVELOPMENT OF A HYPERSPECTRAL AUTOMATED FLIGHT SYSTEM (HALS) BASED ON OFFNER SPECTROMETER FOR OPERATIONAL MONITORING FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

Litvinovich H. S., Lamaka A. A., Ivut P. V., Khomitsevitch A. D.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper presents the development of a hyperspectral automated flight system (HALS) for remote sensing of the Earth from onboard unmanned aerial vehicles (UAV). The technical requirements, optical scheme based on a compact Offner spectrometer is described. The calculated parameters of the system confirm its ability to provide more than 100 spectral bands and spatial resolution in 1 m in the range of 400–900 nm with a field of view of 28°. Onboard data processing allows to significantly reduce the time between collecting information and receiving ready results, which is critical for operational monitoring.

Keywords: hyperspectral imaging, unmanned aerial vehicle, Earth remote sensing, Offner spectrometer, on-board data processing.

*Адрес для переписки: Литвинович Г. С., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: litvinovichgs@yandex.by*

Введение. Для удовлетворения потребностей отраслевых министерств Беларуси, требующих точной географической привязки, беспилотные летательные аппараты являются оптимальным инструментом. Использование гиперспектральных измерений, обеспечивающих высокое спектральное разрешение, позволяет решать широкий круг тематических задач, включая поиск специфических объектов на местности и детальный анализ характеристик поверхностей. Одним из ключевых научных направлений становится экспресс-обработка данных оптических измерений, что особенно актуально в контексте оперативного получения информации.

Гиперспектральная автоматизированная летная система (ГАЛС). В рамках разрабатываемой научной аппаратуры ГАЛС планируется реализация программного модуля на основе нейро, включая классификацию спектров непосредственно во время полета. Обработка данных осуществляется в главном управляющем модуле на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 4 Model B с Unix-подобной операционной системой, что обеспечивает необходимую вычислительную мощность при компактных размерах.

Модульная структура ГАЛС, включающая систему стабилизации, модуль оценки спектральной освещенности и визуализации, обеспечивает универсальность применения как в летных, так и в наземных условиях (может быть помещена на любую наземную подвижную платформу). Такая комплексная система открывает новые возможности для оперативного мониторинга и кросс-калибровки с другими видами аппаратуры, включая космические системы.

Желаемые технические требования ГАЛС. В соответствии со спецификой задачи, под

которую разрабатывается ГАЛС, были выставлены следующие технические требования (таблица 1).

Таблица 1 – Установленные технические характеристики ГАЛС

Пространственное разрешение, м	1
FOV, градусы	~25–30
Скорость движения БЛА, м/с	1
Высота полета БЛА, м	150
Спектральный диапазон, нм	400–900

Оптическая схема ГАЛС. После анализа технических требований был выбран детектор Basler acA1920-40um и объектив Basler Lens C23-1620-5M f16mm. Дополнительно в корпусе гиперспектрометра размещена камера и объектив тех же моделей для видеофиксации измеряемых объектов.

Спектрометр Оффнера представляет собой концентрическую отражательную оптическую систему из трех зеркал: выпуклой сферической дифракционной решетки и двух сферических зеркал, конструктивно выполненных на одной стеклянной подложке. Такой спектрометр имеет малый объем и небольшие искажения регистрируемого спектрального изображения.

Спроектированный в среде оптического моделирования Zemax спектрометр Оффнера показан на рисунке 1.

Первое и третье зеркала выполнены на одной подложке из стекла К8 с радиусом кривизны 75,34 мм, а выпуклая голографическая дифракционная решетка имеет частоту штрихов 300 штр./мм и радиус кривизны 37,5 мм. Все оптические элементы имеют алюминиевое отражающее покрытие. На детекторе установлен интерференционный «красный» фильтр для удаления вторых порядков дифракции.

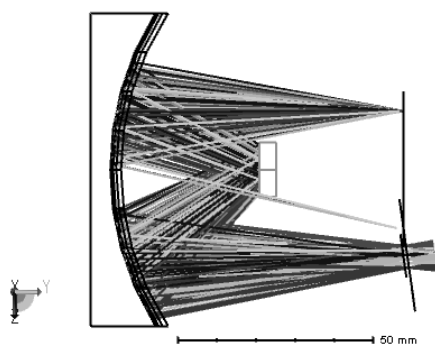


Рисунок 1 – Оптическая схема ГАЛС

Угловое поле зрения гиперспектрометра составило 28° , число регистрируемых спектральных каналов – около 100.

Внешний вид (модель) разработанной системы представлен на рисунке 2.

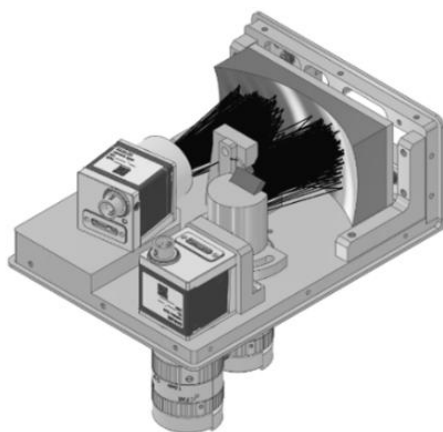


Рисунок 2 – Внешний вид разработанного гиперспектрометра (без защитного кожуха) ГАЛС

С помощью алгоритма, описанного в [1] была рассчитана зависимость отношения сигнал-шум SNR разрабатываемого гиперспектрометра от длины волны при регистрации спектра отражения

растительного объекта для типовых условий летного эксперимента. Рассчитанная зависимость представлена на рисунке 3.

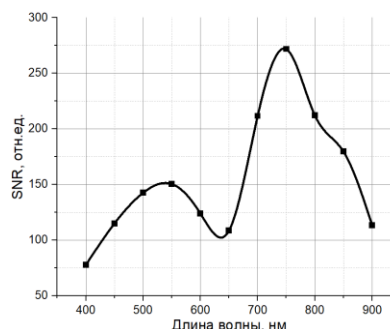


Рисунок 3 – Расчетная зависимость SNR для различных длин волн при регистрации спектра отражения типового растительного объекта в типовых условиях летного эксперимента

Заключение. Проведенные расчеты и проектирование подтвердили возможность создания компактной и эффективной оптической системы на основе спектрометра Оффнера, обеспечивающей более 100 спектральных каналов в заданном диапазоне (400–900 нм) и широкое угловое поле зрения (28°). Рассчитанные показатели отношения сигнал-шум (SNR) демонстрируют, что система способна работать в типовых условиях летного эксперимента и обеспечивать надежную регистрацию данных.

Благодарности. Работа проводится в рамках выполнения отдельного проекта Министерства Образования «Исследование и разработка методов интеллектуального анализа данных, регистрируемых с использованием гиперспектральной автоматизированной летной системы».

Литература

1. Optical Design of a Miniaturized Airborne Push-Broom Spectrometer / Y. Wang, Z. Gu, X. Meng [et al] // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 7. – Art. 2627.

УДК 535.313.2

ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Луцкович З. М.², Федорцев Р. В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Пеленг»

Минск, Беларусь

Аннотация. Проведен анализ совокупных факторов, оказывающих существенное влияние на точность изготовления отражающих поверхностей крупногабаритных асферических зеркал на различных этапах механической обработки. Рассмотрены этапы производства и технического контроля типового технологического процесса изготовления крупногабаритного зеркала объектива диаметром 450 мм.

Ключевые слова: крупногабаритный, асферическое зеркало, технологический процесс, точность формы.

PROBLEMS OF MANUFACTURING LARGE-SIZED OPTICAL ASPHERIC MIRRORS

Lutskovich Z. M.², Fiodartsau R. V.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²Peleng JSC

Minsk, Belarus