



Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования
Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке
Лицензионный договор № 727-11/2014

Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»
Издается с 2019 года

СОДЕРЖАНИЕ

Архипов С.А., Бутяйкин Н.А., Линько В.М., Лузганова М.Ю., Морозов С.А. Исследования дифракционного спектрометра для перспективной гиперспектральной аппаратуры	2
С.Е. Иванов, М.Л. Белов, А.А. Самсонова, В.А. Городничев Оценка дальности зондирования аэрозольного лидара в различных атмосферных условиях на безопасной для зрения длине волны в ближнем ИК диапазоне	13
Бастамова М.А., Денисов Д.Г., *Семенов А.П., Морозов А.Б. Исследование технологического процесса изготовления и метода контроля параметров формы матрицы для внеосевого сегмента асферического зеркала	25
Ким Ехан, О.А. Стасенков Исследование технологии изготовления и метода контроля параметров оптической линзы коллимирующего картриджа лазерной головки установки лазерного раскроя с инновационными технологиями	37
М.Л. Белов, С. Ж.-П. Брийан, В.А. Городничев, А.В. Кувшинов Выбор длин волн зондирования для лазерного рефлектометрического метода контроля состояния растительности	50
Белан А. Р., Пясецкий В. Б., Евстафьева А. Д. Применение мультиспектрального матричного приемника излучения для измерения звездных величин	63

Выходит 4 раза в год.

Журнал печатается при поддержке руководителей организаций и предприятий оптической промышленности и учебных заведений.

Редакционный совет:

Абдулкадыров Магомед Абдуразакович
Архипов Сергей Алексеевич
Бажанов Юрий Владимирович
Барышников Николай Васильевич
Бездидько Сергей Николаевич
Белов Михаил Леонидович
Коротаев Валерий Викторович
Лукин Анатолий Васильевич
Одинокос Сергей Борисович
Сеник Богдан Николаевич
Соколов Андрей Леонидович

Редакционная коллегия:

Барышников Николай Васильевич – главный редактор

Иванов Сергей Евгеньевич
Ильянок Юлия Михайловна
Морозов Сергей Александрович
Белокуров Евгений Александрович

Мнения, высказанные в материалах журнала, не обязательно совпадают с точкой зрения редакции.

Ответственность за содержание статей несут авторы.

© При полной или частичной перепечатке ссылка на журнал «Контенант» обязательна.

Рукописи и фотографии не возвращаются.

Подписано в печать 27.03.2019

Статьи, подготовленные к изданию, передаются редакции электронного научно-технического журнала в издательство по электронной почте nukrlm@bmstu.ru для размещения на сайте научно-технической академии «Контенант» и передачи по договору № 727-11/2014 в Российский Индекс Научного Цитирования Научной Электронной Библиотеки.

Издательство «Контенант»

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Архипов С.А., Бутяйкин Н.А., Линько В.М., Лузганова М.Ю., Морозов С.А.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

Аннотация: Предложено описание основных характеристик спектрометра, построенного на основе схемы Оффнера. Приведены результаты исследования характеристик спектра, полученного на макете спектрометра, построенного по схеме Оффнера.

Ключевые слова: гиперспектральная аппаратура, спектрометр, функция рассеяния, шкала длин волн, интервал спектральной выборки, спектр изображения, схема Оффнера, спектральное разрешение, кривизна спектра.

STUDIES OF DIFFRACTION SPECTROMETERS FOR FUTURE HYPERSPECTRAL INSTRUMENTS

Arkhipov S.A., Butyaykin N.A., Linko V.M., Luzganova M.Yu., Morozov S.A.

PJSC «Krasnogorskiy zavod im. S.A. Zvereva»

Abstract: The description of the main characteristics of the spectrometer based on the Offner scheme is proposed. The results of the study of the characteristics of the spectrum obtained on the model of the spectrometer constructed according to the Offner scheme are presented.

Keywords: hyperspectral instrument, a spectrometer, spectral response function, the scale of the wavelength interval spectral sampling, spectrum image, the scheme of Offner, spectral resolution, the curvature of the spectrum.

Введение

Выходные характеристики съемочной оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) определяют ее способность выявлять информационные признаки-идентификаторы объектов съемки, обеспечивающие решение тематических и/или картографических задач, и объем зарегистрированной информации. Выходные характеристики ОЭА принято разделять по их физической природе на следующие группы:

- пространственно-частотные – определяют геометрические дешифровочные характеристики получаемой информации;

- радиометрические характеристики – определяют спектроэнергетические дешифровочные характеристики получаемой информации;
- фотограмметрические характеристики – определяют точность координатно-временной привязки;
- информационные характеристики – определяет объем информации, содержащейся в видеосигнале получаемом в единицу времени или с единицы площади.

В отличие от многоспектральной ОЭА гиперспектральная аппаратура (ГСА) предназначена для получения изображений одной и той же сцены в сотнях (и более) спектральных каналов, т.е. регистрации подробной спектральной характеристики каждого пиксела изображения.

Принято различать три класса ГСА в зависимости от способа разложения излучения в спектр: дисперсионная, фильтровая ГСА и изображающие интерферометры. Приборный ряд дисперсионной ГСА развивается в направлении перехода от классических призмных, решетчатых спектрометров и линзовых объективов к чисто зеркальной оптике, схемотехнические решения которой совмещают функции построения изображения и разложения излучения в спектр. К этому перспективному направлению относится и схема Оффнера.

В ходе проведения исследований и разработок новой ГСА возникает потребность описания и моделирования ее выходных характеристик. Сложность формулирования выходных характеристик ГСА заключается в выборе таких определений, которые должны быть однозначно и корректно понимаемыми, как с точки зрения Разработчика ГСА, так и с точки зрения Потребителя гиперспектральной информации. Следует отметить, что и зарубежные, и отечественные публикации на эту тему крайне редки [1-5].

Цель статьи – представление определений и модельного описания некоторых характеристик спектрометра, построенного на основе схемы Оффнера и результатов их исследования на макете спектрометра.

Статья подготовлена на основе материалов, полученных в ходе разработки и исследований макета спектрометра, проведенных специалистами ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

Исследование характеристик спектра и его положения относительно строк/столбцов ФПУ

Непрерывный спектр изображения входной щели спектрометра ГСА, проецируемый на фотоприемное устройство (ФПУ), регистрируется с дискретностью следования строк приемника.

Характеристикой, определяющей качество изображения, является функция рассеяния, которая для изображающего спектрометра может быть представлена:

- в направлении разложения спектра – аппаратной спектральной функцией (Spectral Response Function – *SRF*);
- в направлении захвата (поля) – функцией рассеяния линии (Line Spread Function – *LSF*).

Знание этих базовых функций дает возможность определить необходимые для последующей обработки гиперспектральной информации характеристики аппаратуры:

- спектральное разрешение (Full-Width-at-Half-Maximum – *FWHM*) – ширина аппаратной функции спектрального канала аппаратуры на уровне «0,5» от максимума;
- шкала длин волн ($\lambda_{cp}(i)$) – зависимость значений средней на интервале дискретизации длины волны λ_{cp} от номера спектрального канала i ;
- интервал спектральной выборки ($\Delta\lambda$) – разность значений средней длины волны для двух соседних спектральных каналов.

Схематическая иллюстрация этих характеристик представлена на рисунке 1.

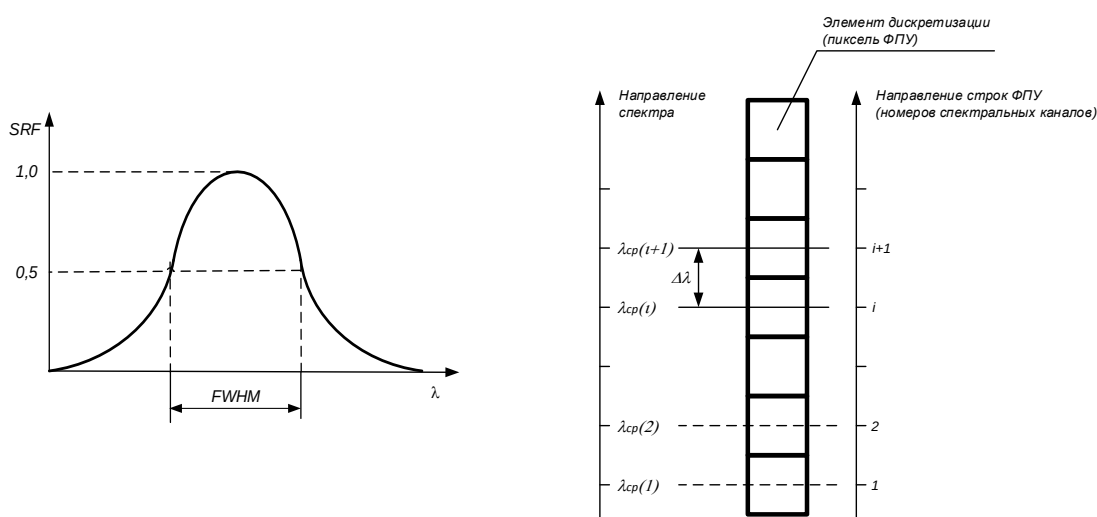


Рисунок 1 – Иллюстрация характеристик аппаратуры

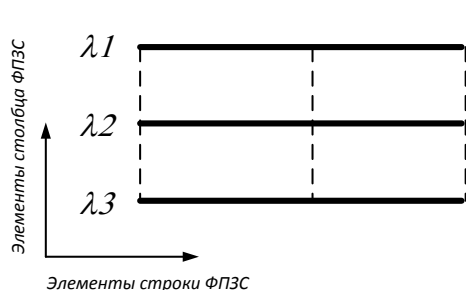
Кроме пространственно-частотных в спектрометре существуют искажения геометрии изображения спектра входной щели, как в спектральном направлении, так и в пространственном, вызванные наличием aberrаций оптической системы, характеристиками дисперсионного устройства (ДУ), погрешностями изготовления и юстировки. Кривизна спектра изображения, получаемого на выходе спектрометра, может быть охарактеризована двумя параметрами:

- кривизна (отклонение направления) спектральной линии относительно направления строк ФПУ – smile-эффект (Δs);
- кривизна (отклонение направления) дисперсии относительно направления столбцов ФПУ, хроматическая разность координат изображения в направлении строки – keystone-эффект (Δk).

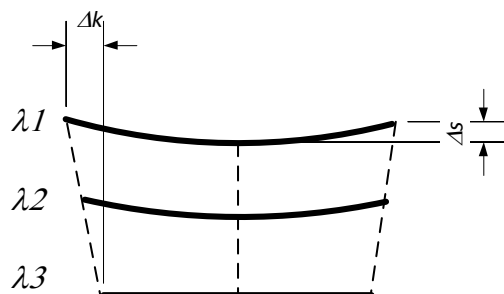
Положение спектра изображения входной щели на ФПУ характеризуется:

- углом между направлением монохроматического изображения щели (спектральной линии) и направлением строк ФПУ и
- углом между направлением дисперсии и направлением столбцов ФПУ.

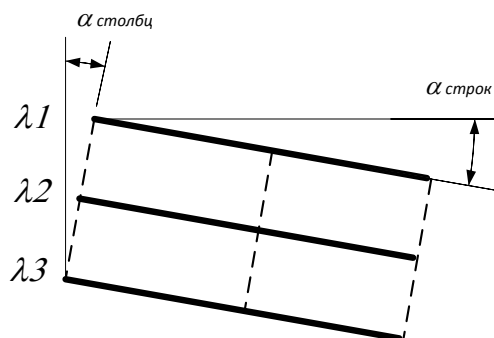
Иллюстрация наклона и кривизны спектра представлена на рисунке 2.



а) кривизна и наклон спектра отсутствуют



б) в спектре присутствуют smile-эффект (Δs) и keystone-эффект (Δk)



в) наклон направления спектральной линии ($\alpha_{\text{строк}}$) и направления дисперсии ($\alpha_{\text{столбц}}$)

Рисунок 2 – Иллюстрация наклона и кривизны спектра

Наилучшее качество «сырой» ГСИ, гарантирующее её эффективное использование обеспечивается за счёт минимизации искажений спектра изображения при проектировании и изготовлении а также проведение аттестации характеристик прибора, с целью их использования при коррекции ГСИ:

- спектральных (ширина нормированной SRF по заданному уровню и ее зависимость от длины волны и по полю зрения, шкала длин волн $\lambda_{cp}(i)$, интервал спектральной выборки $\Delta\lambda$ и кривизна спектра Δs);
- пространственно-частотных (ширина нормированной LSF по заданному уровню и ее зависимость от длины волны и по полю зрения, коэффициент передачи модуляции (как Фурье-преобразование функции LSF) и его зависимость от длины волны и по полю зрения и кривизна спектра Δk).

В процессе макетирования спектрометра на основе схемы Оффнера в ПАО КМЗ была выполнена отработка методического и программного обеспечения контроля спектральных характеристик прибора, результаты которой представлены ниже.

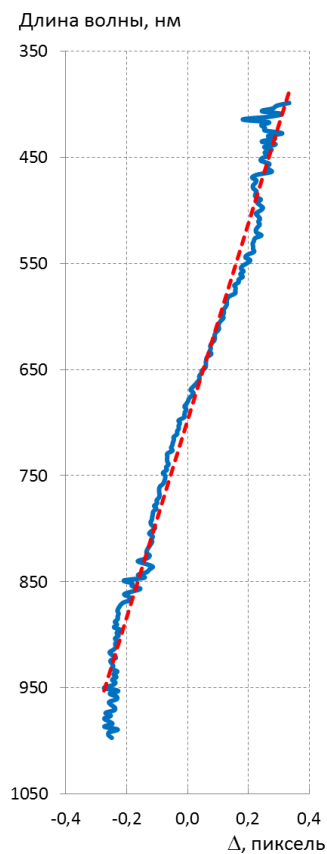
Анализ геометрии спектра

Контроль взаимного углового положения столбцов ФПУ и направления дисперсии в спектрометре выполнялся с использованием специального тест-объекта в виде отдельных штрихов, равномерно распределенных по полю зрения и засвеченных «белым» светом.

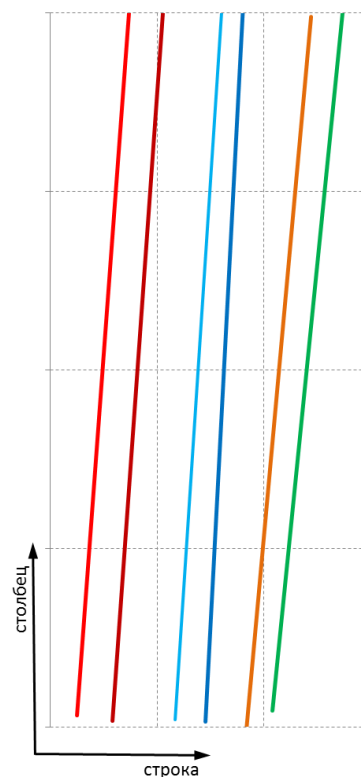
На рисунке 3 представлена зависимость относительного смещения координат изображения тест-объекта от номера строки, характеризующая наклон направления дисперсии относительно столбца ФПУ.

Анализ полученных данных показал, что:

- среднее значение угла между направлением дисперсии и направлением столбцов ФПУ составляет величину $9'4''$, характеризует погрешность юстировки макета и, при необходимости, может быть исправлено разворотом ДУ,
- кривизна дисперсии (keystone-эффект) на исследуемом участке поля составляет $\Delta k=2,1$ мкм, характеризует и параметры спектра, и погрешность юстировки макета и, при необходимости, может быть минимизирована наклоном ФПУ.



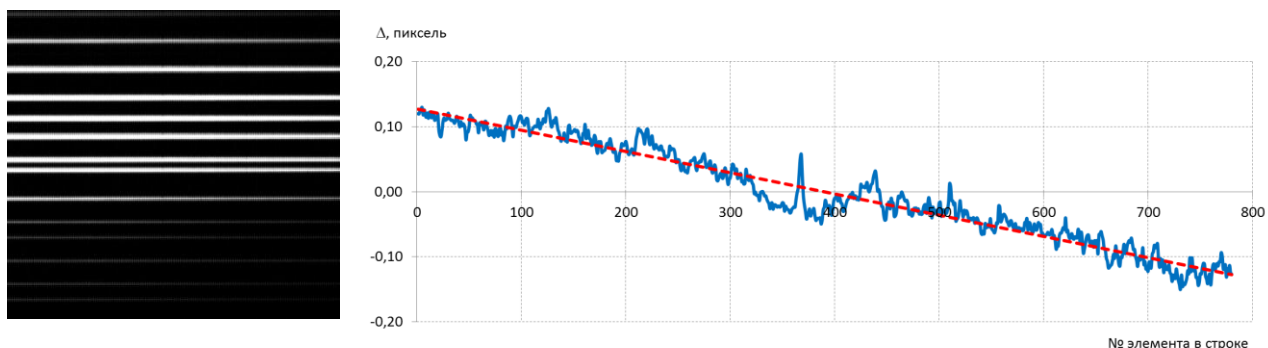
а) График усредненной по полю зрения зависимости относительного смещения координат изображения тест-объекта



б) График направления дисперсии в поле зрения макета спектрометра

Рисунок 3 – Зависимость относительного смещения координат изображения тест-объекта от номера строки

При контроле взаимного углового положения строк ФПУ и направления монохроматического изображения входной щели спектрометра в качестве входного сигнала использовались сигналы от монохроматора МДР-204. Исследования выполнялись для 16 длин волн в диапазоне от 395 нм до 1060 нм, равномерно распределенных по всему диапазону строк ФПУ. Вид кадра видеоинформации, содержащего монохроматические изображения входной щели макета спектрометра, представлен на рисунке 4а.



а) Вид сформированного кадра б) График направления спектральных линий и его линейная аппроксимация (усредненное по всем длинам волн отклонение от среднего значения)

Рисунок 4 – Изображение входной щели макета спектрометра

Анализ полученных результатов показал, что кривизна (smile-эффект) спектральной линии относительно направления строк практически отсутствует ($\Delta s \approx 0$ пикселей), и средний угол между направлением спектральной линии и направлением строк ФПУ составил величину около 1 угл. мин., что характеризует погрешность юстировки, и, при необходимости, может быть исправлено разворотом входной щели макета.

Контроль шкалы длин волн и интервала спектральной выборки

Определение интервала спектральной выборки и аттестация шкалы длин волн спектрометра выполнялись расчетным методом по массиву монохроматических изображений входной щели спектрометра, равномерно распределенных по всему диапазону строк ФПУ в спектральном диапазоне от 395 нм до 1060 нм.

Полученные результаты зависимости номера строки ФПУ от длины волны спектрометра представлены на рисунке 5. Массив измеренной ШДВ аппроксимирован по методу наименьших квадратов полиномом первой степени вида $\lambda_{cp}(i) = a \cdot i + b$.

Интервал спектральной выборки рассчитан как разность значений средних длин волн для двух соседних элементов в столбце кадра, и равен величине $\Delta\lambda = 2,6$ нм для всего спектрального диапазона макета спектрометра.

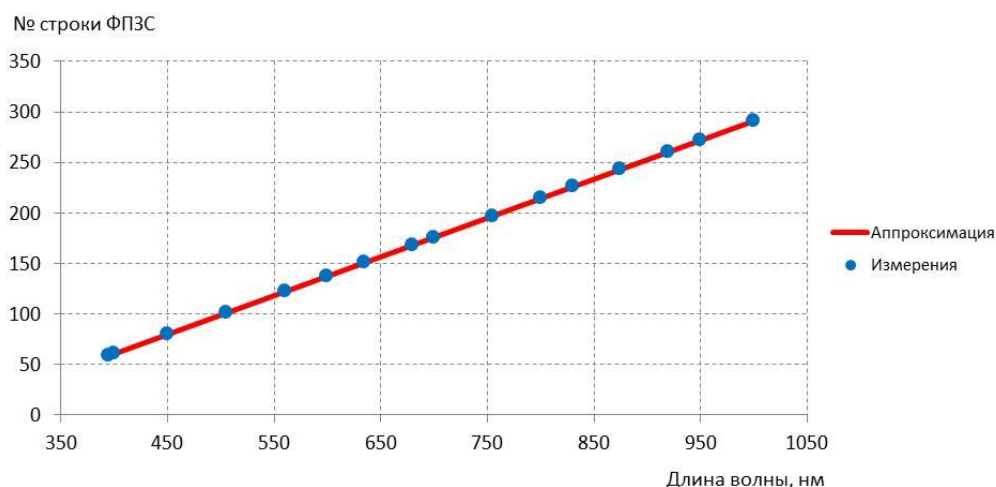


Рисунок 5 – Шкала длин волн макета спектрометра

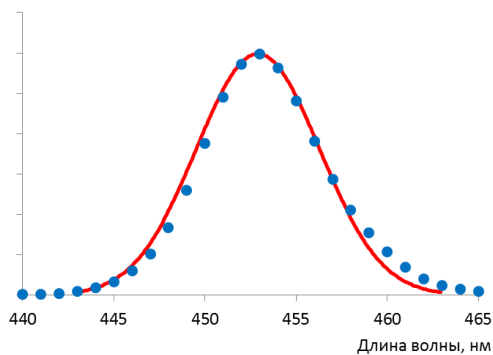
Контроль аппаратной спектральной функции *SRF*

Получение зависимости уровня выходного сигнала от длины волны или от номера элемента в монохроматическом изображении входной щели спектрометра выполнялось для нескольких спектральных поддиапазонов, равномерно распределенных в пределах рабочего спектрального диапазона макета спектрометра.

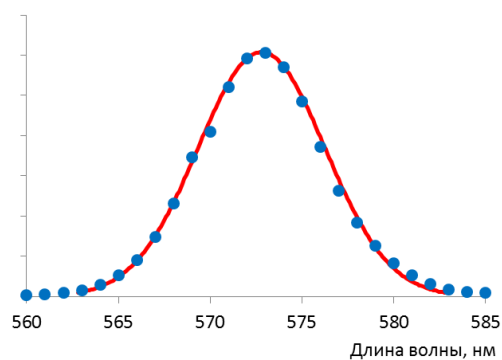
Графики зависимости полученных сигналов от длины волны для выбранного номера строки представлены на рисунке 6. Выполнена аппроксимация измеренных значений сигналов гауссоидой вида:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

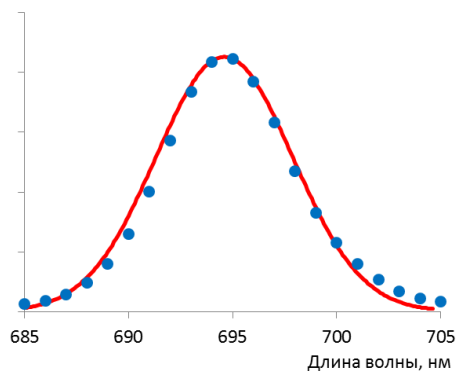
Получены зависимости ширины (в пикселях) нормированной *SRF* по заданному уровню в зависимости от длины волны (номера строки ФПЗС) и в зависимости от точки поля (номера столбца ФПЗС) (см. рисунки 7, 8).



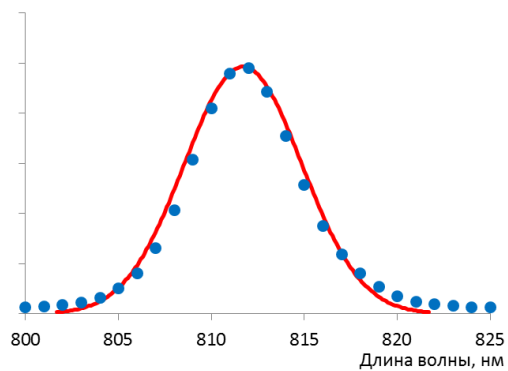
а) строка №81 ($\lambda_{cp}=453,2$ нм)



б) строка №127 ($\lambda_{cp}=573,1$ нм)

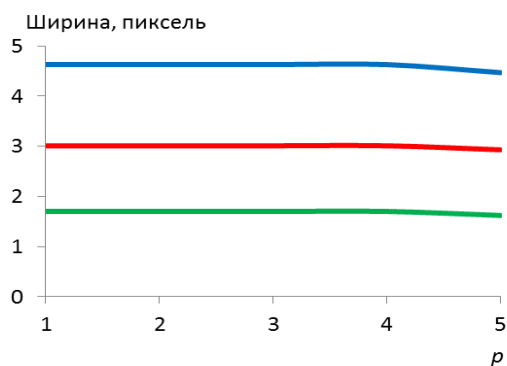


в) строка №174 ($\lambda_{cp}=694,9$ нм)

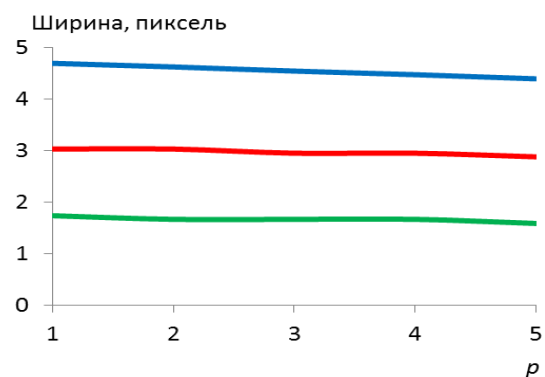


г) строка №219 ($\lambda_{cp}=811,9$ нм)

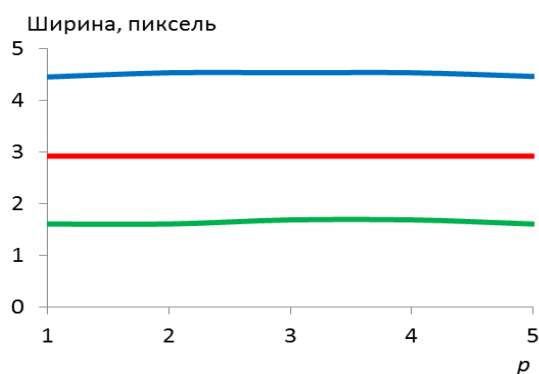
Рисунок 6 – Графики аппаратных спектральных функций SRF (измеренных и аппроксимированных) для нескольких выбранных строк ФПУ



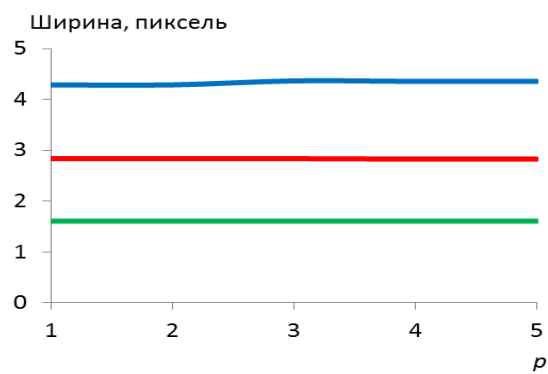
а) строка №81 ($\lambda_{cp}=453,2$ нм)



б) строка №127 ($\lambda_{cp}=573,1$ нм)



в) строка №174 ($\lambda_{cp}=694,9$ нм)



г) строка №219 ($\lambda_{cp}=811,9$ нм)

Рисунок 7 – Зависимость ширины нормированной *SRF* по уровню «0,2» (синяя линия), «0,5» (красная линия) и «0,8» (зеленая линия) от максимума по полю для различных длин волн

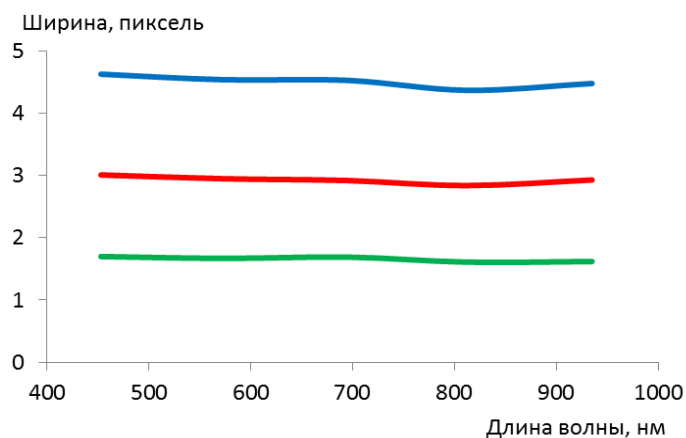


Рисунок 8 – Зависимость ширины нормированной *SRF* по уровню «0,2» (синяя линия), «0,5» (красная линия) и «0,8» (зеленая линия) от максимума от длины волны

Заключение

1. Предложено определение основных характеристик спектрометра и сформированы подходы к их нормированию. В процессе макетирования спектрометра ГСА выполнена экспериментальная отработка методического и программного обеспечения контроля спектральных характеристик прибора.

2. Результаты исследований дифракционного спектрометра подтвердили правильность заложенных принципов юстировки и методик контроля основных характеристик спектра, а также возможность получения гиперспектральной информации с требуемыми выходными параметрами.

3. Созданный в ПАО КМЗ научно-технический задел может быть использован в опытно-конструкторской работе по созданию перспективной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли.

Литература

1. Карпеев С.В., Хонина С.Н., Мурдагулов А.Р., Петров М.В. Юстировка и исследование макетного образца гиперспектрометра по схеме Оффнера // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2016, №1, т.15, С.197-206.
2. Артюхина Н.К., Котов М.Н. Особенности построения видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли из космоса // Приборы и методы измерений, №1, 2010, С.56-62.
3. Holly A. Bender, Pantazis Mouroulis, Michael L. Eastwood, Robert O. Green, Sven Geier, Eric B. Hochberg Alignment and characterization of high uniformity imaging spectrometers // SPIE, Vol. 8158, 2011.
4. Robert A. Neville, Lixin Sub, Karl Staenz Detection of spectral line curvature in imaging spectrometer data // Proceedings of SPIE, Vol. 5093, 2003.
5. Robert A. Neville, Lixin Sub, Karl Staenz Detection of keystone in imaging spectrometer data // Proceedings of SPIE, Vol. 5425, 2004.

ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ЗОНДИРОВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА В РАЗЛИЧНЫХ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ НА БЕЗОПАСНОЙ ДЛЯ ЗРЕНИЯ ДЛИНЕ ВОЛНЫ В БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ

С.Е. Иванов, М.Л. Белов, А.А. Самсонова, В.А. Городничев

Аннотация: Проведен энергетический расчет аэрозольного лидара в ближнем ИК спектральном диапазоне. Приведены основные формулы, используемые для расчета энергетических характеристик аэрозольного лидара и фонового излучения земной атмосферы в ближнем ИК спектральном диапазоне. Проведена оценка дальности зондирования аэрозольного лидара на безопасной для зрения длине волны зондирования 1,57 мкм. Показано, что минимальная дальность зондирования реализуется для земной атмосферы с высокой прозрачностью (метеорологическая дальность видимости 40 км) и для оптически плотной земной атмосферы (метеорологическая дальность видимости 2 км). Максимальная дальность зондирования (~1,2 км) реализуется при заданном отношении сигнал/шум 100 для земной атмосферы с метеорологической дальностью видимости ~ 8 - 12 км.

Ключевые слова: Дальность зондирования, аэрозольный лидар, ближний ИК диапазон.

CALCULATION OF AEROSOL LIDAR SOUNDING RANGE IN VARIOUS ATMOSPHERIC CONDITIONS FOR EYE-SAFE LASER WAVELENGTHS IN NEAR IR SPECTRAL BAND

S.E. Ivanov, M.L. Belov, A.A. Samsonova, V.A. Gorodnichev

Abstract: Calculation of sounding range for aerosol lidar in near IR spectral band is given. Basic formulas for calculation of aerosol lidar energy characteristics and earth atmosphere background radiation in near IR spectral band are given. Estimation of aerosol lidar sounding range is conducted for eye-safe sounding laser wavelengths 1,57 μm . It is shown that, minimal sounding range takes place for clear earth atmosphere (meteorological range of visibility 40 km) and for optically-dense earth atmosphere (meteorological range of visibility 2 km). Maximal sounding range (~1,2 km) takes place for signal-to-noise ratio 100 in earth atmosphere with meteorological range of visibility ~ 8 - 12 km.

Keywords: aerosol lidar, near IR spectral band.

Введение

Среди методов зондирования земной атмосферы наиболее эффективными являются методы дистанционного лазерного зондирования. Они позволяют оперативно получать данные о полях характеристик земной атмосферы с высоким пространственным разрешением (см., например, [1-3]). При этом, приемник импульсного лазерного локатора (лидара) регистрирует лазерный эхо-сигнал (вызванный рассеянием на молекулах и аэрозольных частицах) со всей трассы зондирования.

Аэрозольные лидары, предназначенные для дистанционного зондирования аэрозольной атмосферы, позволяют оперативно измерять параметры атмосферного аэрозоля и облачных образований в земной атмосфере (см., например, [1-7]). Также, перспективными (с точки зрения практических приложений) являются лидары для определения направления и модуля скорости перемещения атмосферного аэрозоля и неоднородностей аэрозольной атмосферы (см., например, [8-11]).

На сегодняшний день аэрозольные лидары работают в видимом спектральном диапазоне или ближнем инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне с длинами волн 1,06 мкм и менее. Однако, практический интерес (с точки зрения как низких значений яркости фонового солнечного излучения, так и безопасности для зрения) представляет ближний инфракрасный спектральный диапазон с длинами волн более 1,4 мкм.

Данная статья посвящена энергетическому расчету аэрозольного лидара на безопасной для зрения длине волны зондирования в ближнем ИК спектральном диапазоне с длинами волн более 1,4 мкм.

1. Постановка задачи

Использование активных лазерных систем для дистанционного зондирования земной атмосферы всегда потенциально опасно для зрения людей. Однако, не все лазерные длины волн одинаково опасны для глаз.

Наиболее опасным является лазерное излучение видимого и ближнего инфракрасного спектрального диапазона 0,38 – 1,4 мкм, которое хорошо проходит через передние среды глаза и может вызвать повреждение сетчатки. Излучение ближнего инфракрасного спектрального диапазона с длинами волн более 1,4 мкм воздействует на передние среды глаза и является более безопасным [12,13].

Результаты работ [12,13] позволяют оценить безопасность для глаз при использовании длин волн в широком спектральном диапазоне – от ультрафиолетового

(с длиной волны 0,2 мкм) до среднего инфракрасного (с длиной волны 10 мкм) при длительностях и частотах повторения импульсов, характерных для систем лазерного мониторинга (длительность импульса 6 нс, частота повторения 100 Гц). Они показывают, что с точки зрения безопасности для глаз при дистанционном зондировании надо использовать лазерные длины волн в спектральном диапазоне $\sim 1,4 - 2$ мкм.

Для лазерных систем, предназначенных для работы в земной атмосфере, возможный (с точки зрения безопасности для глаз) спектральный диапазон сокращается. В ближнем ИК спектральном диапазоне возможные длины волн ограничены окнами прозрачности атмосферы 1,5 - 1,8 мкм и 2,1 - 2,4 мкм (в основном из-за поглощения парами воды и углекислым газом). В этих окнах прозрачности возможными лазерными источниками могут быть оптические параметрические генераторы, лазеры на эрбиевом стекле, лазеры на алюмо-иттриевом гранате с легированием гольмием и др.

Результаты исследований спектральных зависимостей характеристик аэрозольной земной атмосферы [14] показывают, что для задачи зондирования атмосферы длина волны $\sim 1,5 \dots 1,6$ мкм имеет явное преимущество перед длиной волны ~ 2 мкм.

Оценка дальности зондирования аэрозольного лидара в приземном слое в условиях прозрачной атмосферы проводилась в работе [15] для ближнего УФ спектрального диапазона на длине волны 0,355 мкм и в работах [16,17] для видимого и ближнего ИК диапазона на длинах волн 0,532 и 1,57 мкм. При этом, в качестве фотодетектора в приемном канале лидара для длины волны 1,57 мкм был использован фотоэлектронный умножитель (что является не лучшим выбором для длины волны излучения 1,57 мкм).

В данной работе оценка дальности зондирования аэрозольного лидара проводится для приземного слоя в широком диапазоне атмосферных условий на длине волны 1,57 мкм в ближнем ИК диапазоне. При этом, в качестве фотодетектора в приемном канале лидара используется лавинный фотодиод (с наилучшими для длины волны 1,57 мкм характеристиками чувствительности).

2. Расчет энергетических характеристик аэрозольного лидара в ближнем ИК диапазоне спектра

Энергия лазерного эхо-сигнала E_S обратно (в сторону лидара) рассеянного атмосферным аэрозолем и регистрируемого приемником лидара (за время детектирования τ_d) можно представить в приближении однократного рассеяния (что является хорошим приближением в ближнем ИК диапазоне) в следующем виде (см., например, [10,18]):

$$E_S(z) = P_o K_t K_r c \tau_t r_r^2 \tau_d \beta(z) \chi_\pi(z) T_v(z) G(z) / 8, \quad (1)$$

где P_o – мощность излучения лазерного источника лидара; K_r , K_t – коэффициенты пропускания приемной и передающей оптических систем; c – скорость света; τ_t – длительность импульса лазерного источника лидара; r_r – радиус приемного объектива; $\beta(z)$ – показатель аэрозольного рассеяния земной атмосферы на длине волны излучения лидара на расстоянии z от лидара; z – расстояние от лидара до объема атмосферы (от которого в момент времени t приходит сигнал обратного рассеяния на приемник); $\chi_\pi(z)$ – индикатриса аэрозольного рассеяния атмосферы в обратном направлении; $T_v^{1/2}(z) = \exp\left(-\int_0^z \varepsilon(x) dx - \int_0^z k(x) dx\right)$; $T_v^{1/2}(z)$ – коэффициент пропускания земной атмосферы на трассе «лидар – объем атмосферы на расстоянии z от лидара»; $\varepsilon(z)$ – показатель аэрозольного ослабления атмосферы на длине волны излучения лидара; $k(z)$ – показатель поглощения атмосферными газами на длине волны излучения лидара; $G(z)$ – геометрическая функция лидара.

Для биаксиальной моностатической схемы зондирования (с параллельными оптическими осями передающего и приемного каналов лидара) геометрическая функция лидара имеет вид (в гауссовом приближении):

$$G(z) = \frac{\alpha_r^2}{r_r^2 + r_t^2 + z^2(\alpha_r^2 + \alpha_t^2)} \exp\left\{-\frac{b^2}{r_r^2 + r_t^2 + (\alpha_r^2 + \alpha_t^2)z^2}\right\},$$

где b – база (расстояние между оптическими осями передающего и приемного каналов); α_r, α_t – поле зрения приемной оптической системы и угол расходимости излучения; r_t – эффективный радиус апертуры передающей оптической системы лидара.

Наряду с полезным лазерным сигналом на приемник лидара в ближнем ИК диапазоне приходит фоновое излучение, обусловленное рассеянным в земной атмосфере солнечным излучением.

Энергию $E_b^N(\lambda)$ фонового излучения (за время детектирования τ_d) для лидара с узким полем зрения и узкополосным спектральным фильтром можно представить в виде (см., например, [19]):

$$E_b^N(\lambda) = L_b(\lambda) \Delta\lambda \Omega_o A_o \tau_d, \quad (2)$$

где $L_b(\lambda)$ - спектральная яркость фонового излучения; $\Delta\lambda$ - ширина полосы пропускания спектрального фильтра приемной системы; Ω_o - телесный угол поля зрения оптической приемной системы ($\Omega_o = \pi\alpha_r^2$); A_o - площадь приемного объектива.

Строгий расчет спектральной яркости фонового излучения является сложной задачей [19,20]. Однако, при высокой прозрачности земной атмосферы (что имеет место в ближнем ИК диапазоне) для расчета яркости фонового излучения можно использовать приближение однократного рассеяния. В приземном слое атмосферы в случае лазерного зондирования в направлениях близких к горизонтальным для расчета величины $L_b(\lambda)$ имеем [19]:

$$L_b = 0,25\lambda_s S_\lambda \chi(\gamma) \frac{\cos\theta_o}{\cos\theta - \cos\theta_o} \left\{ \exp\left[-\frac{\tau_o}{\cos\theta}\right] - \exp\left[-\frac{\tau_o}{\cos\theta_o}\right] \right\}, \quad (3)$$

где $\cos\gamma = \cos\theta\cos\theta_o + \sin\theta\sin\theta_o\cos(\phi-\phi_o)$; λ_s - отношение показателей рассеяния и ослабления атмосферы; $\chi(\gamma)$ - индикатриса рассеяния земной атмосферы; γ - угол рассеяния; πS_λ - спектральная солнечная постоянная (на длине волны зондирования); τ_o - оптическая толщина (в вертикальном направлении) всей земной атмосферы на длине волны зондирования; θ_o, ϕ_o - зенитный угол и азимут Солнца; θ, ϕ - зенитный угол и азимут направления зондирования.

3. Оценка дальности зондирования аэрозольного лидара в ближнем ИК диапазоне спектра

Приемник лидара всегда регистрирует лазерный сигнал на фоне шумов, ограничивающих дальность зондирования лидара.

Наиболее общая формула для минимально обнаруживаемой энергии импульса-сигнала $E_{\text{Smin}}(\lambda)$ за время детектирования τ_d имеет вид [21]:

$$E_{\text{Smin}}(\lambda) = \frac{1}{2} \mu^2 E(\lambda) \left[1 + \left\{ 1 + \frac{4}{\mu^2} \left[\frac{E_b^T(\lambda)}{E(\lambda)} + \frac{i_d + i_j}{2eB^*} \right] \right\}^{1/2} \right] \quad (4)$$

где $E(\lambda) = \frac{hcF_G}{\lambda \eta(\lambda) \xi_e}$; $B^* = \frac{BF_G}{\xi_e}$; $B = \frac{1}{2\tau_d}$; $i_j = \frac{2kT}{eG^2 \xi_e R_{eq} F_G}$; μ - заданное отношение сигнал-шум; $\eta(\lambda)$ - квантовый выход на длине волны λ ; i_d - ток утечки лавинного фотодиода; i_j - эффективный ток Джонсона; G - усиление фотодетектора; F_G - параметр усиления шума ($F_G \sim 1-2,5$); $\xi_e \sim 1$; при расчетах полагалось $\frac{F_G}{\xi_e} \approx 1$ [21]; R_{eq} , T - эквивалентное сопротивление нагрузки выходной цепи и его абсолютная температура; k - постоянная Больцмана.

В качестве фотодетектора для лидаров в ближнем ИК спектральном диапазоне, как правило, выбирают лавинный фотодиод, т.к. он обладает наибольшей спектральной чувствительностью.

Оценка дальности зондирования аэрозольного лидара на длине волны 1,57 мкм проводилась для лавинного фотодиода G8931-20 [22] (со спектральной чувствительностью на длине волны 1570 нм ~ 900 мА/Вт. $i_d = 150$ нА. Полоса 300 МГц) и импульсного лазера CFR 400 с энергией в импульсе 65 мДж, длительностью импульса 11 нс и частотой повторения 30 Гц [23].

Спектральная солнечная постоянная на длине волны 1,57 мкм $\sim 0,024$ Вт/см² мкм, оптическая толща земной атмосферы $\tau_o \sim 0,14$ [19]. Ширина спектрального фильтра приемной системы $\Delta\lambda$ считалась равной 12 нм. Считалось, что $R_{eq} = 50$ Ом. $T = 300$ К. При расчете спектральной яркости фонового излучения полагалось, что земная атмосфера безоблачная, зенитный угол Солнца 45° , трасса зондирования - горизонтальная. Угол расходимости излучения лидара и поле зрения приемной оптической системы полагались равными, соответственно, 1 мрад и 2 мрад. Коэффициенты пропускания передающей и приемной оптических систем - 0,9 и 0,5. Диаметр приемного объектива считался равным 0,3 м. Отношение сигнал/шум полагалось равным 100.

Результаты расчетов минимально обнаруживаемой энергии $E_{S_{\min}}$ и зависимости энергии лазерного сигнала E_S от расстояния z (от лидара до рассеивающего объема атмосферы) представлены на рисунках 1 - 9 для разных оптических состояний атмосферы. Оптические характеристики атмосферы вычислялись на основе метеорологической дальности видимости S_M и эмпирических коэффициентов, определяющих спектральную зависимость показателя ослабления для разных оптических состояний атмосферы [19].

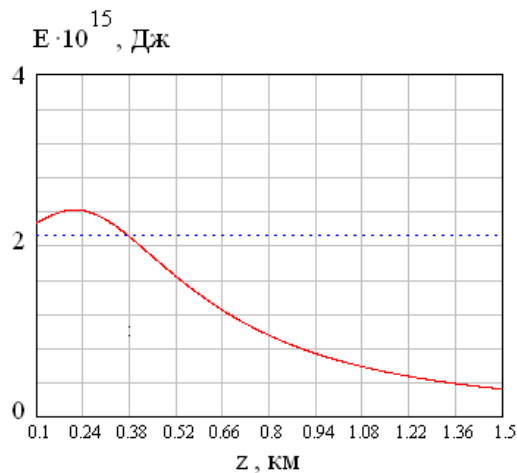


Рисунок 1 – Прозрачная атмосферы.
 $S_M=40$ км

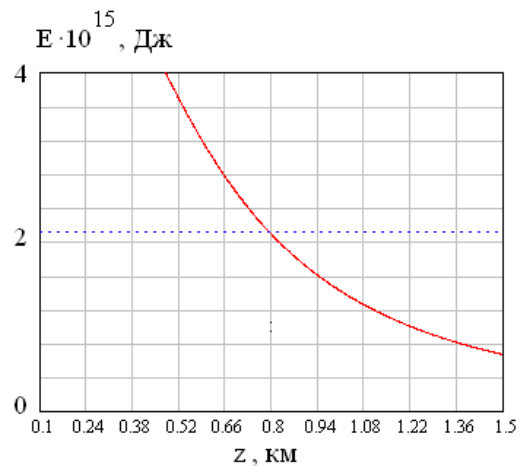


Рисунок 2 – Устойчивая дымки
(лето). $S_M=20$ км

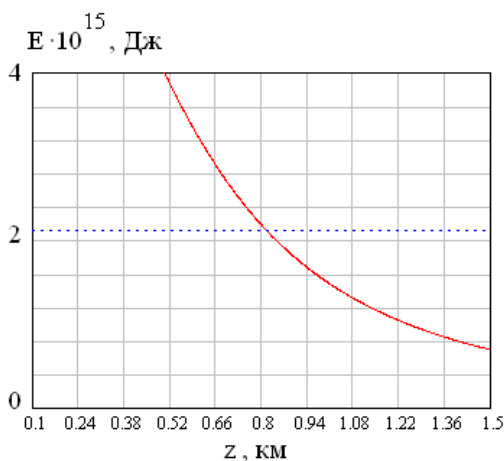


Рисунок 3 – Дымка после сильного дождя.
 $S_M=15$ км

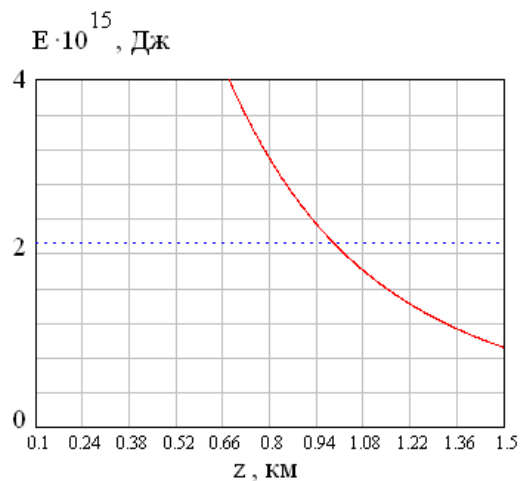


Рисунок 4 – Устойчивая дымка. $S_M=10$ км

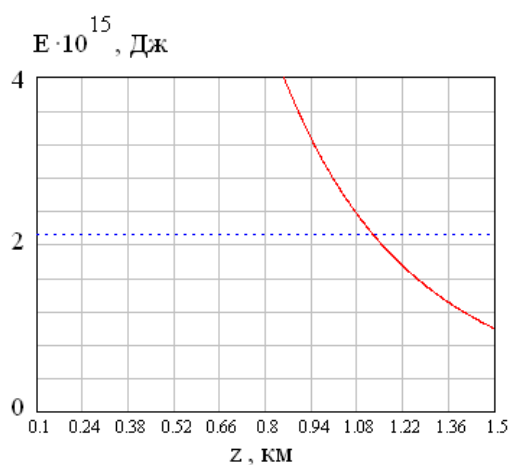


Рисунок 5 – Ледяная дымка. $S_M = 8$ км

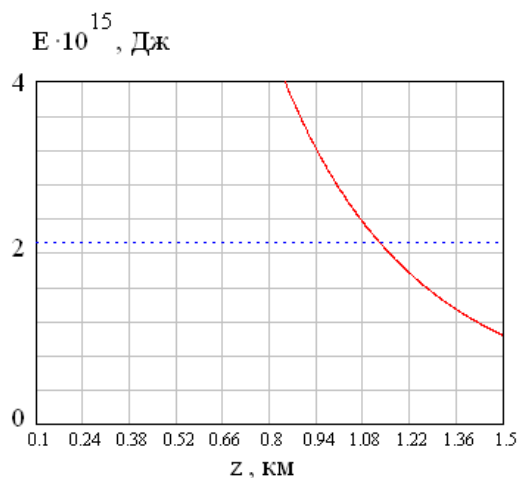


Рисунок 6 – Зимняя дымка. $S_M = 6$ км

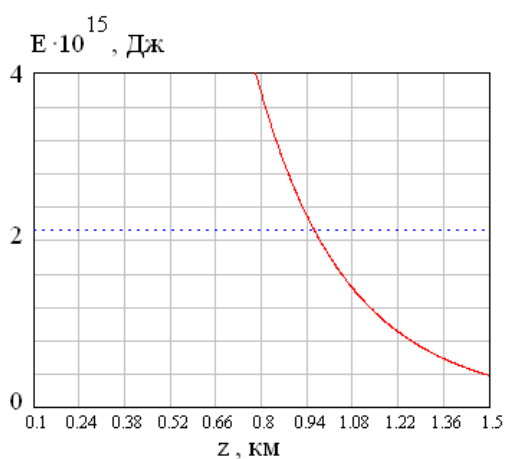


Рисунок 7 – Дымка со снегом. $S_M = 5$ км

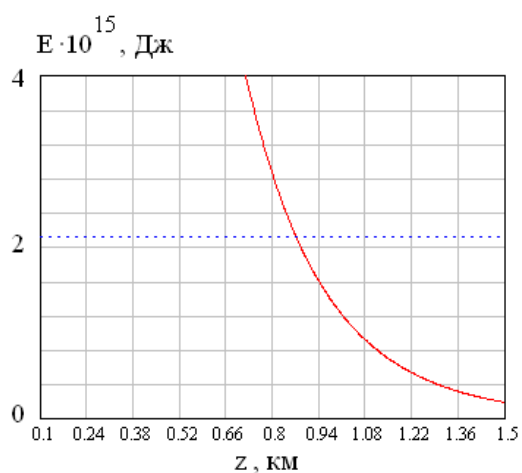


Рисунок 8 – Дымка с моросью. $S_M = 3$ км

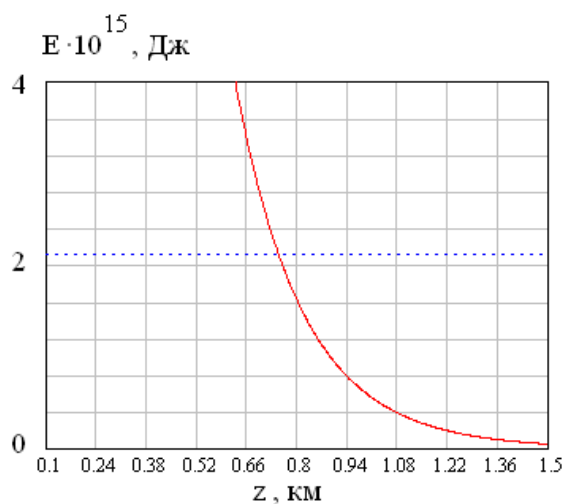


Рисунок 9 – Туманная дымка. $S_M = 2$ км

Предельные дальности зондирования, которые оценивались из условия равенства энергии лазерного сигнала E_S и минимально обнаруживаемой энергии

$E_{S_{\min}}$, представлены на рисунке 10. На рисунке: 1 – прозрачная атмосферы. $S_M = 40$ км; 2 – устойчивая дымка (лето). $S_M = 20$ км; 3 – дымка после сильного дождя. $S_M = 15$ км; 4 – устойчивая дымка (лето); $S_M = 10$ км; 5 – ледяная дымка. $S_M = 8$ км; 6 – зимняя дымка. $S_M = 6$ км; 7 – дымка со снегом. $S_M = 5$ км; 8 – дымка с моросью. $S_M = 3$ км; 9 – туманная дымка. $S_M = 2$ км.

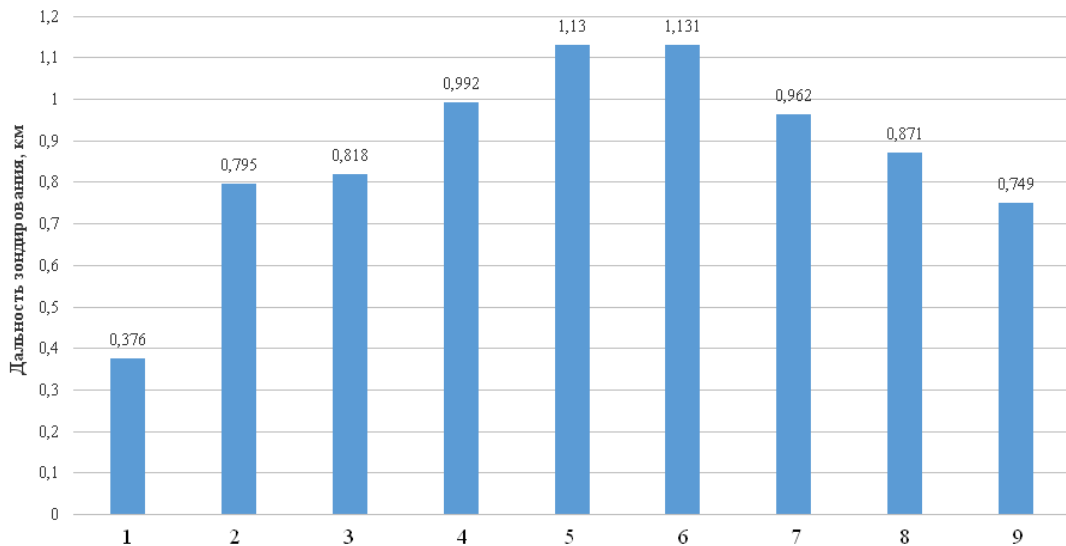


Рисунок 10 – Зависимость дальности зондирования аэрозольного лидара от оптического состояния атмосферы

Из рисунка 10 видно, что минимальная дальность зондирования реализуется для земной атмосферы с высокой прозрачностью (метеорологическая дальность видимости 40 км) и для оптически плотной земной атмосферы (метеорологическая дальность видимости 2 км), максимальная дальность зондирования (~1,2 км) реализуется при заданном отношении сигнал/шум $\mu = 100$ для земной атмосферы с метеорологической дальностью видимости ~ 6 – 10 км.

Заключение

Статья посвящена энергетическому расчету аэрозольного лидара в ближнем ИК спектральном диапазоне. Приведены основные формулы, используемые для расчета энергетических характеристик аэрозольного лидара и фонового излучения земной атмосферы в ближнем ИК спектральном диапазоне. Проведена оценка дальности зондирования аэрозольного лидара на безопасной для зрения длине волны зондирования 1,57 мкм. Показано, что минимальная дальность зондирования реализуется для земной атмосферы с высокой прозрачностью (метеорологическая дальность видимости 40 км) и для оптически плотной земной атмосферы

(метеорологическая дальность видимости 2 км), максимальная дальность зондирования (~1,2 км) реализуется при заданном отношении сигнал/шум $\mu=100$ для земной атмосферы с метеорологической дальностью видимости ~ 6 - 10 км.

Литература

1. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В.Стрелков. М.: Изд-во МГТУ, 2002. 528 с.
2. Иванов В.И., Малевич И.А., Чайковский А.П. Многофункциональные лидарные системы. Мн.: Университетское, 1986. 286 с.
3. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 186 с.
4. Аэрозольный лидар CATS. Режим доступа: http://www.laserportal.ru/content_956 (дата обращения 20.12.2018).
5. Бурлаков В. Д., Долгий С. И., Невзоров А. В. Трехчастотный лидар для зондирования микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 6. С. 125–130.
6. Волков Н.Н.. Выбор параметров многоволнового аэрозольного лидара для дистанционного зондирования атмосферы. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2012, № 1 (77), С. 7-9.
7. Лазерные лидарные комплексы. Режим доступа: <http://www.adventspb.ru/science/6/> (дата обращения 20.12.2018).
8. Козинцев В. И., Иванов С. Е., Белов М. Л., Городничев В. А. Лазерный метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т.26. №5. С. 381-384.
9. Zhi-Shen Liu, Dong Wu, Jin-Tao Liu, Kai-Lin Zhang, Wei-Biao Chen, Xiao-Quan Song, Johnathan W. Hair, Chiao-Yao She. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter // Applied Optics. 2002. Vol. 41. N 33. P. 7079-7086.
10. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Заде, Э.С. Фердинандов, И.Н. Колев, Р.П. Аврамова. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.

11. Применение корреляционных методов в атмосферной оптике/ В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов, Н.И. Юрга, М.Л. Белов, А.Ф. Овчаренко. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.
12. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. ГОСТ 31581-2012. М.: Стандартинформ, 2013
13. Mayor S.D., Spuler S.M., Morley B.M. Scattering eye-safe depolarization lidar at 1.54 microns and potential usefulness in bioaerosol plume detection // Proceedings of SPIE. 2005. Vol. 5887, P. 137-148.
14. М.Л. Белов, В.А. Городничев, Кравцов Д.А., Черпакова А.А. Выбор безопасных для зрения длин волн излучения в УФ и ближнем ИК спектральных диапазонах для задач дистанционного зондирования // Электронное научно-техническое издание “Наука и образование”. № 2, февраль 2016. <http://technomag.bmstu.ru/doc/832497.html> (дата обращения 20.06.2018)..
15. С.Е. Иванов, М.Л. Белов, П.А. Филимонов, В.А. Городничев, М.Б. Михайловская. Расчет энергетических характеристик аэрозольного лидара в ближнем УФ спектральном диапазоне Научно-технический журнал «Контенант» Том 16, номер 4, 2017 г. С. 62-67.
16. С.Е. Иванов, П.А. Филимонов, М.Л. Белов, В.А. Городничев. Дальность зондирования ветрового лидара в ближней инфракрасной области спектра Научно-технический журнал «Контенант» Том 13, номер 2, июнь 2014 г.
17. С.Е. Иванов, П.А. Филимонов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, М.Б. Михайловская. Сравнительный анализ дальности зондирования ветрового корреляционного лидара в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах Электронное научно-техническое издание “Наука и образование” февраль 2014, № 2 <http://technomag.bmstu.ru/doc/696580.html> (дата обращения 20.06.2018).
18. А.П. Филимонов, С.Е. Иванов, М.Л. Белов, В.А. Городничев. Анализ зависимости зоны засветки приемника от параметров атмосферы и лазерного локаатора в УФ спектральном диапазоне. Электронное научно-техническое издание “Наука и образование”. № 9, сентябрь 2016. <http://technomag.neicon.ru/doc/845030.html> / (дата обращения 20.12.2018).
19. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В.Стрелков. М.: Изд-во МГТУ, 2010. Издание 2-е дополненное. 572 с.

20. Сигналы и помехи в лазерной локации / В.М.Орлов, И.В.Самохвалов, Г.М.Креков, В.Л. Миронов, Ю.С. Балин, В.А. Банах, М.Л. Белов, Ю.Д. Копытин, В.П. Лукин. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
21. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550с.
22. InGaAs APD G8931-20. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4003/4111/G8931-20/index.html> (дата обращения 20.06.2016).
23. CFR 400. Режим доступа: <https://www.gophotonics.com/products/lasers/quantel-laser/29-168-cfr-400> (дата обращения 20.06.2018).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ МАТРИЦЫ ДЛЯ ВНЕОСЕВОГО СЕГМЕНТА АСФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

Бастамова М.А., Денисов Д.Г., *Семенов А.П., *Морозов А.Б.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

*АО «Лыткаринский завод оптического стекла», Московская обл., г. Лыткарино

E-mail: lastro@lzos.ru

Аннотация: В работе рассмотрен процесс изготовления и метод контроля параметров формы матрицы для дальнейшего изготовления внеосевого сегмента асферического зеркала. Особенностью матрицы является высокая асферичность поверхности 7.6мм и требование по отклонению от параболической формы не более 10мкм. Исследованы наиболее важные операции технологического процесса, такие как создание асферической поверхности на этапах грубого и тонкого шлифования. Подробно рассмотрена установка и метод контроля качества поверхности. В качестве прибора контроля использовался высокоточный прибор ATOS Triple Scan III.

Ключевые слова: асферическая поверхность, технологический процесс, внеосевой, оптическая поверхность, метод триангуляции.

INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGICAL MANUFACTURING PROCESS AND THE CONTROL METHOD OF THE MATRIX SHAPE PARAMETERS FOR ASPHERICAL OFF-AXIS SEGMENT MIRROR

Bastamova M.A., Denisov D.G., * Semenov A.P., *Morozov A.B.

Bauman's Moscow state technical university, Moscow

* AO «Lytkarinsky Optical Glass Factory», Moscow Region, Lytkarino

E-mail: lastro@lzos.ru

Abstract: This paper describes the manufacturing process and the method of controlling the shape parameters of the matrix for the off-axis segment of an aspherical mirror. A feature of the matrix is 7.6 mm the high asphericity of the surface of 7.6 mm and the requirement for deviation from the parabolic shape of not more than 10 microns. The most important operations of the technological process, such as creating an aspherical surface at the stages of rough and fine milling, are investigated. The installation and method of quality control

surface are considered in detail. The high-precision ATOS Triple Scan III was used as the control instrument.

Keywords: aspherical surface, technological process, off-axis, optical surface, triangulation method.

Введение

Для исследования различных объектов Вселенной, таких как структура ядер, галактик, черных дыр, пульсаров, в миллиметровом и инфракрасном диапазонах на длинах волн от 0,02 до 17 мм, астрокосмический центр учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН) создает зеркало для космического телескопа «Миллиметрон» (рисунок 1). Телескоп должен работать в режиме, в котором измерения будут проводиться с максимальной чувствительностью, достижимой с приемниками излучения космических объектов на борту. Телескоп будет иметь зеркало 10 м в диаметре, 24 лепестка из высокопрочного твердотельного углепластика, точность оптической поверхности должна достигать 10 мкм [1, 2]. Для прессования элементов главного зеркала АО «ЛЗОС» уже изготавливает матрицы разных размеров и с разной степенью асферичности поверхности (от 1,3 до 20 мм). Данные матрицы служат для того, чтобы на них формовались углепластиковые конструкции, поэтому к качеству их поверхности предъявляются самые строгие требования. Допускаемые отклонения для всего главного зеркала обсерватории «Миллиметрон» диаметром 10 м составляют менее 100 микрон при асферичности 140 мм [2, 3].

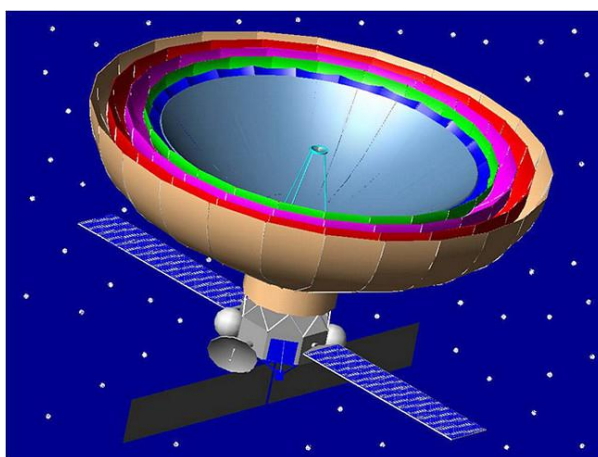


Рисунок 1 – Телескоп «Миллиметрон»

В качестве примера рассмотрим изготовление одной из матриц в АО «ЛЗОС». Сама матрица представляет собой - оптический элемент с внеосевой высокоасферичной

оптической поверхностью, с некруглой формой внешнего периметра детали. Асферичность матрицы составляет 7.6 мм. Контур матрицы - трапеция, малое основание равно 423,4 мм, большое - 758,1 мм, длина достигает 1392,4 мм. Фокусное расстояние параболоида $F = 2400.0$ мм (рисунок 2).

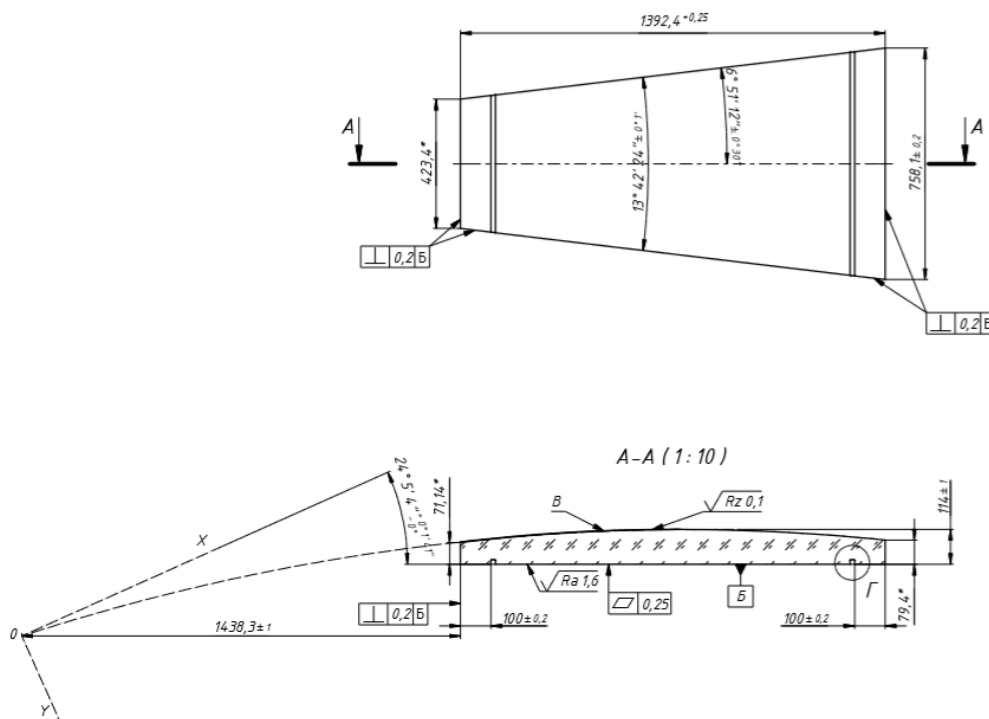


Рисунок 2 – Чертеж матрицы

Основные этапы технологического процесса

Основной задачей данной работы является разработка технологического процесса, обеспечивающего необходимое качество оптической поверхности асферической детали после прецизионного прессования. Рассмотрим наиболее важные технологические этапы его производства.

Вначале заготовка стекла, закрепленная на зеркале стола, обрабатывается шлифовальным кругом диаметром 500 мм по плоскости с двух сторон на станке ВСЗ-45 (рисунок 3). На этом этапе необходимо выдержать шероховатость поверхности $Rz \leq 40$ мкм. Далее на станке ОС-1500 происходит шлифование шлифпорошками тыльной поверхности, которая является базовой (рисунок 4). Выдерживается шероховатость поверхности $Ra \leq 1,6$ мкм и неплоскостность не более минус 0,01 мм на базе 400 мм. Следующим шагом идет фрезеровка габаритных размеров алмазным сверлом на станке 2Е-470 (рисунок 5). Выдерживается шероховатость поверхности $Ra \leq 1,6$ мкм, перпендикулярность двух боковых и торцевых поверхностей к тыльной

поверхности (допускается отступление от заданного параметра не более 0,2 мм). Деталь принимает трапецидальную форму на станке 2Е-470, на этом же этапе происходит фрезерование 12 фасок на ребрах размером 1,5+0,5x450 мм и на трехгранных углах размером 2+1x450мм. Фрезеруются пазы на тыльной поверхности.

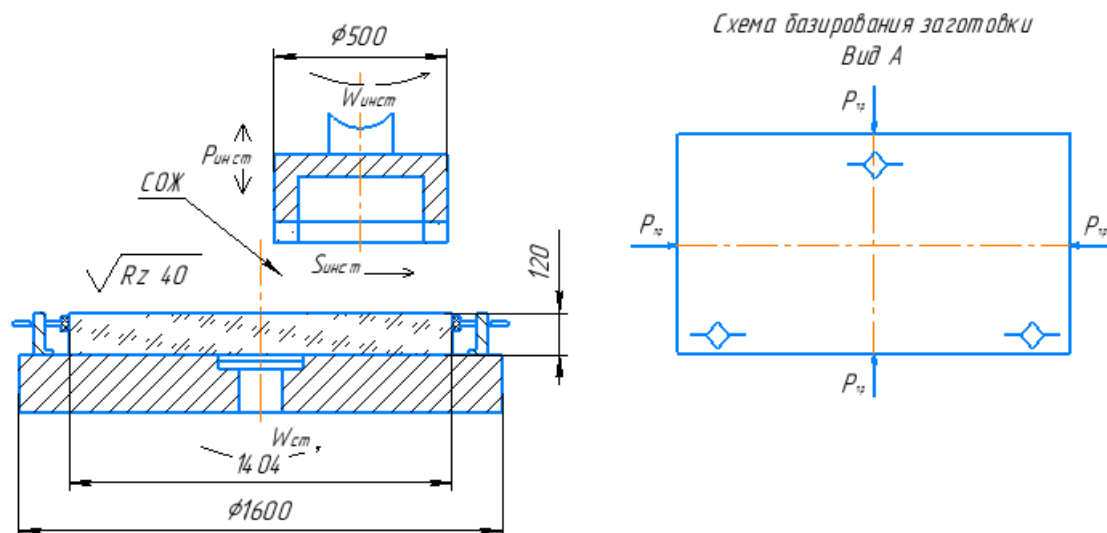


Рисунок 3 – Эскиз операции фрезерование на станке ВС3-45

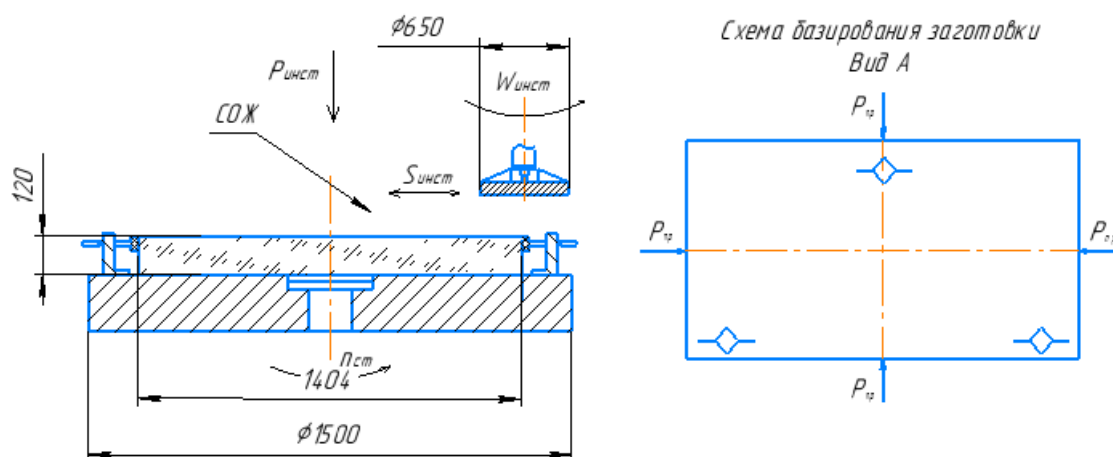


Рисунок 4 – Эскиз операции шлифование на станке ОС-1500

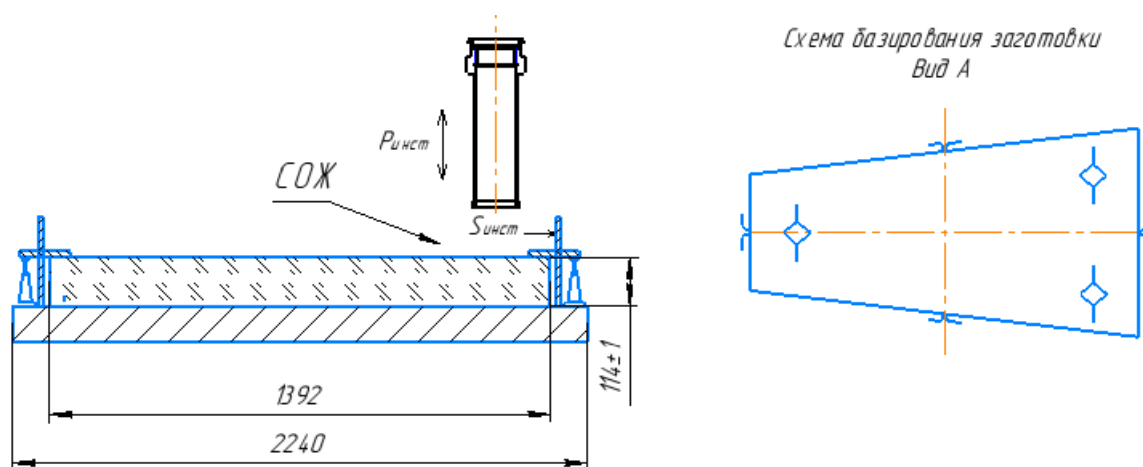


Рисунок 5 – Эскиз операции фрезерования на станке 2Е-470

Высокоасферический профиль поверхности рассчитывался по алгоритму расчета трехточечной сферы сравнения. Рабочая оптическая поверхность имеет форму параболоида, который описывается выражением:

$$Y = \frac{X^2}{4 \cdot F}, \quad (1)$$

где X , Y - координаты, $F=2400$ мм – фокусное расстояние параболоида.

Или в каноническом виде:

$$X^2 + Y^2 = 2 \cdot R_o \cdot Z, \quad (2)$$

где $R_o = 4800$ мм.

Этого достаточно для вычисления всех геометрических и технологических параметров. Центр параболоида смещён относительно малого основания трапеции на 1438.3 мм, и наклонен относительно плоскости трапеции на угол $\varphi=24^\circ 5' 4''$ (рисунок 6).

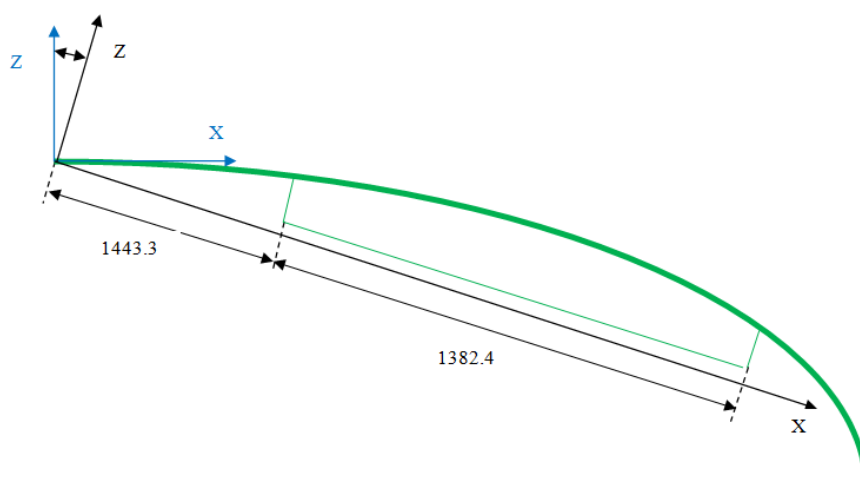


Рисунок 6 – Профиль параболической поверхности в системе координат параболы и системе координат детали

Асферичность по чертежу задана 7,6 мм. Задачей являлся расчёт ближайшей сферы сравнения. Внеосевая парабола указывается каноническим уравнением в системе координат параболы. Для того, чтобы параметры поверхности можно было задать для станка с числовым программным управлением, создается система координат детали, помимо системы координат параболы. Для совмещения канонических уравнений поверхности выполнен пересчет координат контрольных точек лепестка в систему координат детали из системы координат параболы. Ближайшая базовая сфера для внеосевого параболоида вычисляется в системе координат параболоида, ее центр находится на оси параболоида, а ее радиус равен 5295,64 мм. Отклонение параболоида от сферы определяется как припуск, его размах составил 7745 мкм, а распределение приведено на рисунке 7.

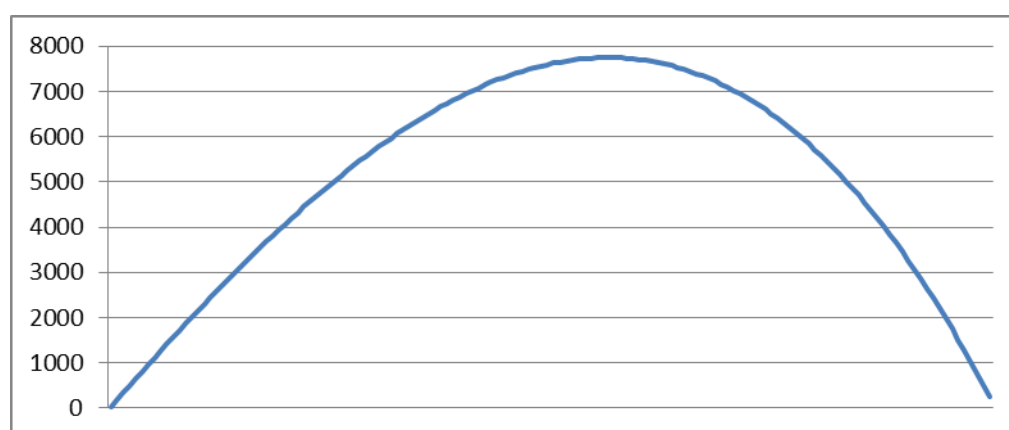


Рисунок 7 – Распределение припуска в микронах

На матрице сразу формировалась выпуклая внеосевая асферическая поверхность. Работа выполнялась путем фрезерования кольцевым алмазным инструментом под управлением ЧПУ. Заготовка детали представляет собой трапецеидальную призму, а конечная рабочая поверхность является внеосевым параболоидом (рисунок 8). Очевидно, что форму внеосевого параболоида можно создать только с помощью фрезерного станка с числовым программным управлением. Однако даже создание управляющей программы для такой нестандартной поверхности является непростой задачей. Возникают две основные проблемы. Во-первых, крайне неравномерный припуск по детали, на углах детали необходимо снять порядка 30 мм материала, тогда как по центру детали припуск составляет около 1 мм. Во-вторых, данная форма поверхности приводит к тому, что инструмент работает практически одной точкой, а это значит, что в управляющей программе необходимо прописать координаты всех точек по поверхности.

Первая проблема решается разбиением процесса обработки на два этапа. На первом этапе происходит грубая обдирка с большим съёмом материала по простой траектории. Инструмент снимает до 2 мм за проход. Результатом первого этапа является серия ступенек на детали, повторяющих форму параболоида (рисунок 8). На втором этапе формируется уже непосредственно требуемая поверхность. Это достигается за счёт мелкого шага фрезы и движения инструмента по радиусу секторов. Съём не превышал 0,5 мм. Очевидно, что чем меньше шаг между соседними проходами инструмента, тем более гладкая поверхность получится. Однако, вместе с качеством поверхности также увеличивается и время, необходимое для обработки. Поэтому шаг подбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить необходимое качество поверхности перед шлифовкой детали, а с другой – чтобы время обработки не превышало приемлемой величины.

Вторая проблема, связанная с необходимостью задания в управляющей программе координат практически всех точек поверхности, решается использованием CAD и CAM программного обеспечения. Сначала необходимо по чертежам создать трёхмерные модели конечной детали и заготовки в CAD программе. Далее эти модели загружаются в CAM программное обеспечение. И уже с помощью CAM программы происходит расчёт необходимых координат траектории инструмента и, соответственно, генерация кода управляющей программы (рисунок 9). Сложность заключается в том, что все CAM программы рассчитаны на обработку дерева или металлов и не учитывают такие особенностей обработки стекла, как траектория захода инструмента на деталь, сочетание конкретных траекторий резания с определённым съёмом материала и некоторые другие. Таким образом, возникает необходимость вручную править код управляющей программы с учётом опыта обработки стеклокерамики.

Такой подход позволил также снизить глубину нарушенного слоя. Как показали дальнейшие измерения, полученные асферические поверхности имеют отклонения менее чем 100 микрон. Общее время фрезерования асферической поверхности детали составило до 2 месяцев.

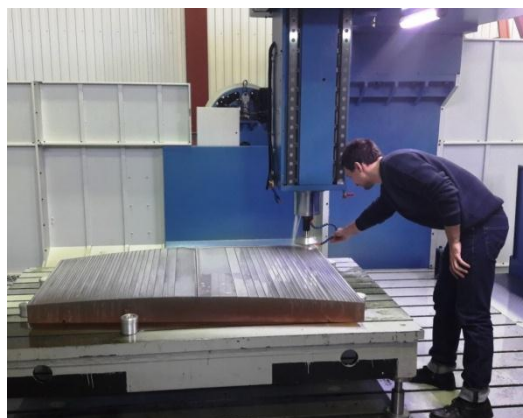


Рисунок 8 – Программно-управляемое фрезерование внеосевой выпуклой асферической поверхности матрицы

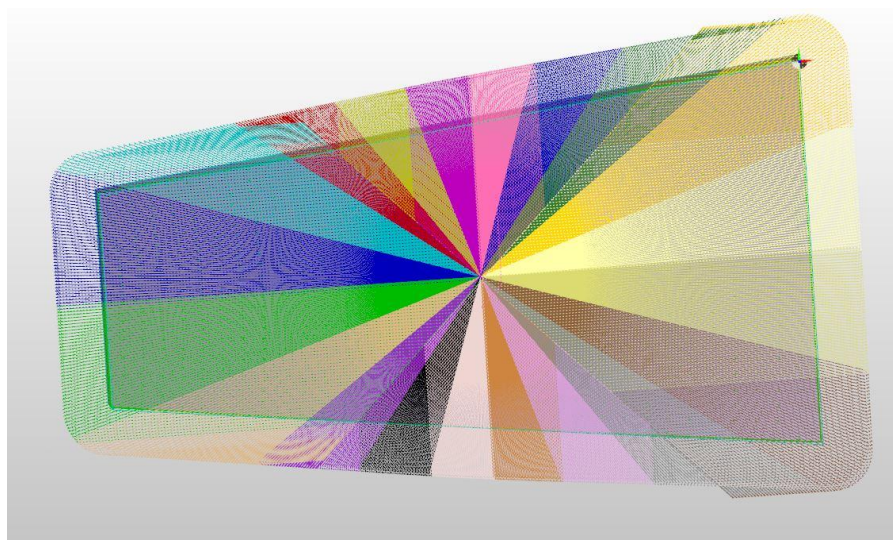


Рисунок 9 – Траектория движения инструмента при чистовой обработке

Завершающие операции, такие как шлифование асферической поверхности и полировка асферической поверхности с выдерживанием СКО волнового фронта ≤ 1 мкм, проводятся на автоматизированном станке АД-2000 (рисунок 10). Шлифование поверхности должно устранить следы обработки. Асферическая поверхность шлифуется шлифпорошками М40, М28, М14, М10. Шлифовка осуществляется гибким инструментом на резиновой подложке с латунными пятками (рисунок 11) с тремя разными диаметрами (80 мм, 130 мм, 180 мм). Инструмент осуществляет постоянный контакт всей его поверхности с поверхностью обрабатываемой детали при перемещении инструмента по поверхности детали. Он обладает эластичностью, принимает форму поверхности, соответствующей форме обрабатываемой поверхности в данной области и создает максимально возможное давление на деталь для осуществления съема материала, в том числе и краевыми областями инструмента. На первоначальной стадии обработка велась в режиме заглаживания по траекториям так, что инструмент с одинаковой скоростью проходил по всей поверхности детали,

реализуя равномерный съем. Для устранения остаточного рельефа после фрезерования применялась более крупная фракция абразива, а затем все более мелкая для устранения остаточных ошибок и получения требуемой для полировки шероховатости. Далее на станке АД2000 производится полировка асферической поверхности с выдерживанием СКО волнового фронта 1мкм.



Рисунок 10 – Станок АД-2000



Рисунок 11 – Шлифующий инструмент

Контроль формы поверхности

На этапе формообразования поверхности проводился контроль формы поверхности [4].

Была разработана система контроля, включающая в себя прибор контроля ATOS III Triple Scan, саму матрицу, подложку, ножки, поворотный стол, штатив (рис.12). Матрица лежала на подложке, которая крепилась на выдвижные ножки таким образом, что можно было контролировать высоту матрицы и ее горизонтальное положение. Ножки стояли на поворотном столе. Прибор ATOS III Triple Scan крепился на штативе над матрицей на определенном расстоянии. Предложенная система позволяла фотографировать матрицу при разных поворотах стола (рисунке 13).

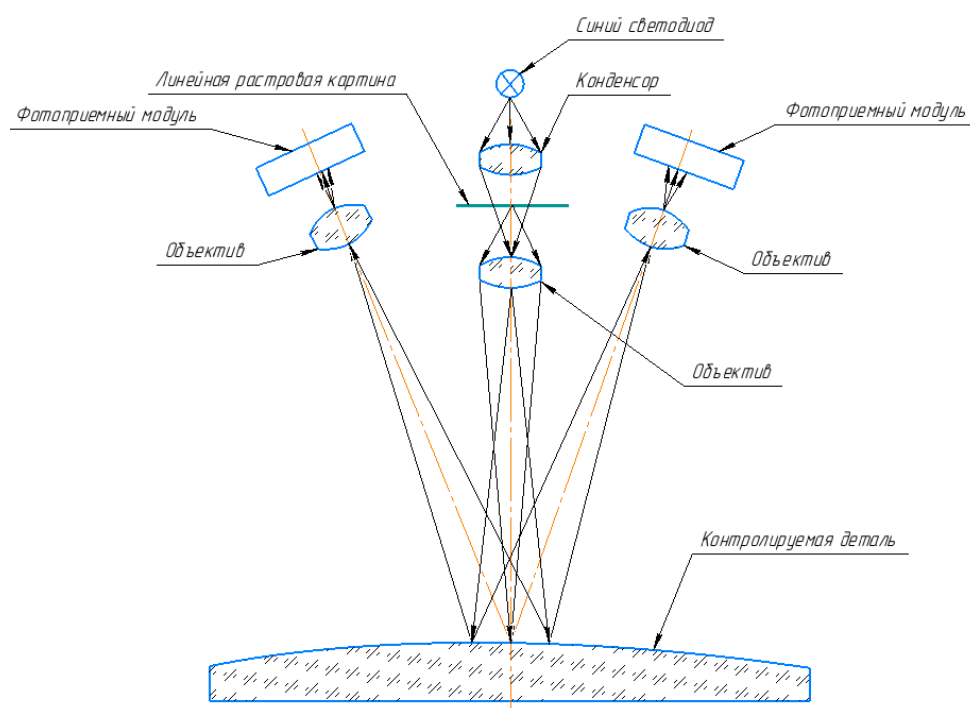


Рисунок 12 – Функциональная схема системы контроля

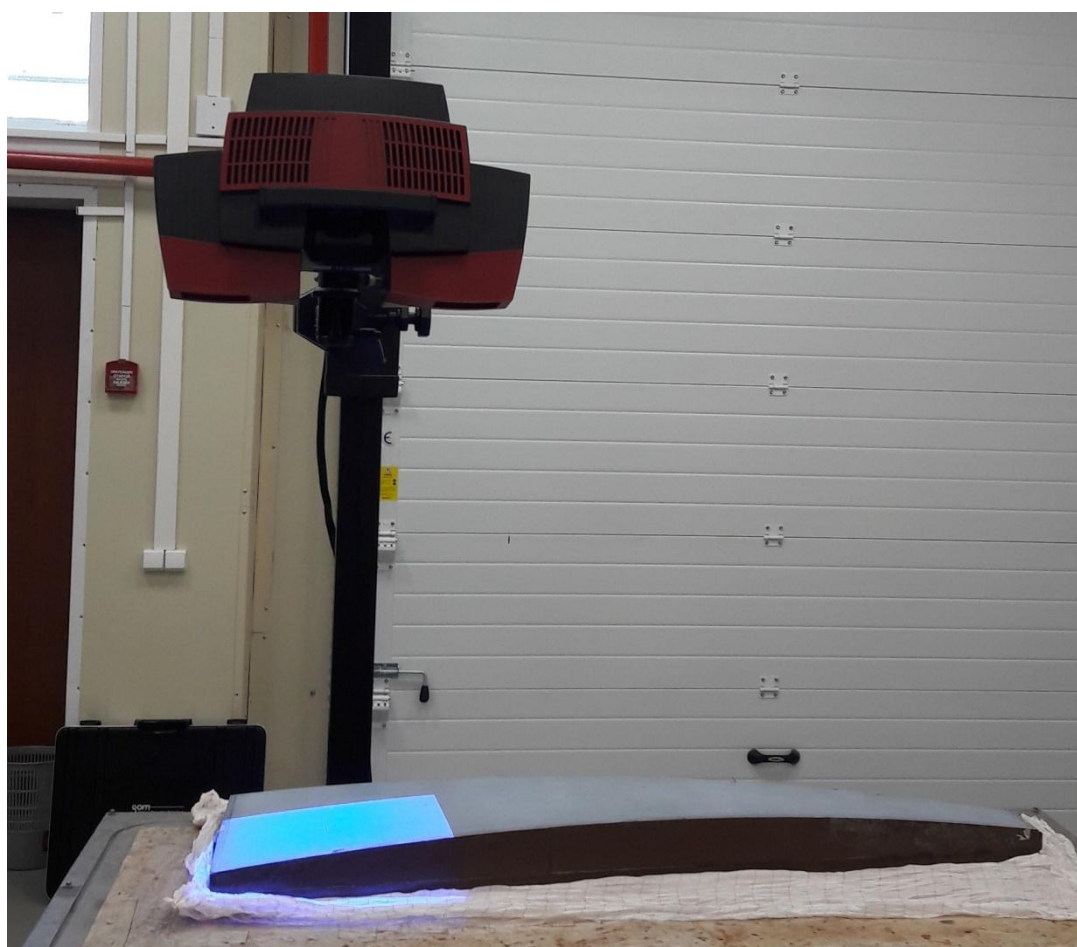


Рисунок 13 – Установка контроля

ATOS Triple Scan (рисунок 14) - бесконтактная координатно-измерительная машина, предназначенная для высокоточного измерения мелких и крупных объектов.

Прибор обладает точностью до 10 микрон со скоростью сбора данных до 16 млн точек в секунду. Контроль проводится путем сравнения результатов оцифровки и эталонным образцом. В результате будет получаться цветовая картина отклонений поверхности с выявлением дефектов. С помощью двух высокоточных камер, может быть покрыта большая площадь поверхности и передана геометрия сложных деталей.



Рисунок 14 – Прибор ATOS Triple Scan

Прибор ATOS Triple Scan установлен на штативе, встроенный проектор со светодиодным источником света, проецирует последовательные интерференционные изображения на поверхность детали. Интерференционные линии на асферической поверхности перестают быть прямыми, определенная форма линий образует поверхность, которую прибор контроля записывает как эталонную. Две камеры синхронно фиксируют спроецированные интерференционные линии на поверхности. Полученные под двумя разными углами изображения оцифровываются. По принципу метода триангуляции определяется расстояние от камер до контролируемого объекта, и вычисляются трехмерные координаты каждой точки. Центры камер, проектор и точка на объекте создают треугольник, из которого системой вычисляется одна из сторон треугольника по формуле:

$$D = \frac{L \cdot \sin(b) \cdot \sin(g)}{\sin(b+g)} \quad (3)$$

В системе, после установки камер, становится известно расстояние между камерами L . Углы b и g вычисляются по формулам тригонометрии исходя из того, что известен угол между камерами α (рисунок 15). Таким образом, после оцифровки кривых линий интерференционных изображений, для каждой точки сканируемой поверхности получены трехмерные координаты. Все точки образуют «облако». Подвижная стойка крепления позволяет перемещаться системе и снимать новый участок поверхности. На каждый такой участок наклеивается свой маркер, координаты центра маркера вычисляются автоматически. Сам контроль заключается в сравнении эталонной поверхности с изготовленной [5].

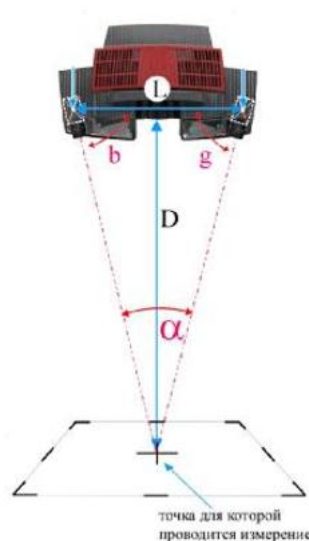


Рисунок 15 – Демонстрация триангуляционного метода прибора ATOS Triple Scan

Заключение

Исследован технологический процесс изготовления и метод контроля параметров формы матрицы для внеосевого сегмента асферического зеркала. Рассмотрены и изучены основные этапы изготовления внеосевого сегмента на производственной площадке АО ЛЗОС, проанализирована система контроля асферической поверхности. Изготовленная деталь соответствует требуемым параметрам: выдержана асферичность поверхности 7.6 мм, отклонение от формы не превышает 10 мкм.

Литература

1. Главный сайт Астрокосмического центра <http://asc-lebedev.ru>
2. Semenov A. P., Abdulkadyrov M. A., Patrikeev V. E. Aspherization of off-axis high-asphericity mirrors with arbitrary external circuit by means of CNC machines //Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II. – International Society for Optics and Photonics, 2016. – Т. 9912. – С. 991246.
3. Semenov A. P. et al. Automatic aspherization of off-axis highly aspheric surfaces of large optical items //Journal of Optical Technology. – 2017. – Т. 84. – №. 11. – С. 767-772.
4. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. “Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects),” Proceedings of SPIE 8450, 84504T (2012).
5. Burge J. H., Su P., Zhao C. Optical metrology for very large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 2008. V.7018. P.701818-1 - 701818-12.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МЕТОДА КОНТРОЛЯ
ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ КОЛЛИМИРУЮЩЕГО КАРТРИДЖА
ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ УСТАНОВКИ ЛАЗЕРНОГО РАСКРОЯ С
ИННОВАЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

Ким Ехан, О.А. Стасенков

Аннотация: В работе рассмотрена технология изготовления и методы контроля параметров оптической линзы коллимирующего картриджа лазерной головки установки лазерного раскроя. В ходе работы были рассмотрены технологические процессы изготовления оптической линзы с внедрением инновационных технологий.

Ключевые слова: технологический процесс, оптическая линза, методы контроля, инновационные технологии и оборудования.

**RESEARCH OF TECHNOLOGY OF MANUFACTURING AND METHOD OF
CONTROL OF PARAMETERS OF THE OPTICAL LENS OF A COLLIMATING
CARTRIDGE OF A LASER HEAD INSTALLATION OF A LASER CUTTING WITH
INNOVATIVE TECHNOLOGIES**

Kim Yohan, O.A. Stasenkov

Abstract: The paper discusses the manufacturing technology and methods for monitoring the parameters of the optical lens of a laser head collimating cartridge of a laser cutting unit. In the course of the work, the existing technological processes of manufacturing an optical lens were compared with technological processes with the introduction of innovative technologies.

Keywords: technological process, optical lens, control methods, innovative technologies and equipment.

Введение

Лазеры ближнего ИК-диапазона широко применяются в различных технологических процессах обработки материалов, поскольку излучение на длине волны около 1 мкм интенсивно поглощается металлами. В настоящее время в лазерных технологических установках широко используются непрерывные итербиевые волоконные лазеры с мощностью излучения от единиц до нескольких десятков киловатт.

На качество обработки материала влияют характеристики узлов лазерной технологической установки. Одним из таких ключевых узлов является лазерная головка, а точнее — ее оптическая система, формирующая пучок излучения мощного лазера. К разработке и изготовлению элементов силовой оптики предъявляются особые технические требования.

Поэтому актуальной задачей является разработка оптимального варианта технологического процесса изготовления и контроля оптических линз для лазерной головки. При этом во время технологического процесса важно сохранять точность изготовления и поддерживать высокие требования, предъявляемые к материалу и к самой оптической линзе, так как оптическая система используется для формирования пучка мощного выходного излучения. Оптимальный технологический процесс подразумевает собой выбор технологий обработки поверхности линзы, выбор правильной последовательности обработки, а также выбор оборудования и приспособлений.

Проанализировав существующий стандартный технологический процесс и изучив различное оборудование и различные приспособления, был разработан инновационный технологический процесс изготовления оптических линз (рисунок 1) с заданными геометрическими параметрами для лазерной головки.

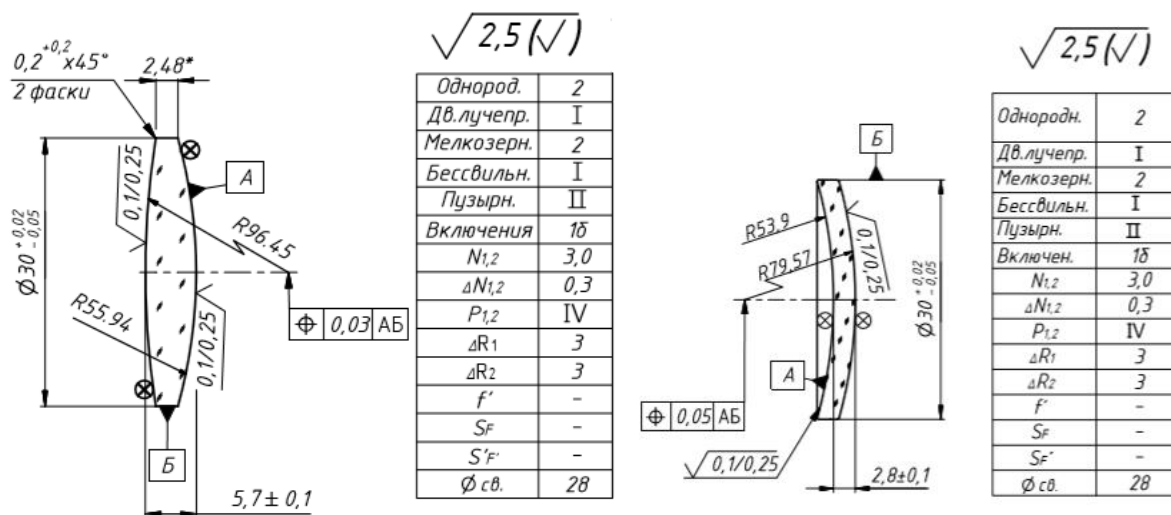


Рисунок 1 – Линзы

Основная часть

Рассмотрим наиболее важные технологические этапы производства оптического изделия.

Разметка заготовки осуществляется с учетом слоя стекла, теряемого при распиливании, то есть необходимо учесть припуск на толщину алмазного

распиловочного круга [1]. Распиливание выполняется на распиловочном станке IDS 22: G&N (рисунок 2,3), где в качестве инструмента используется алмазный отрезной круг.

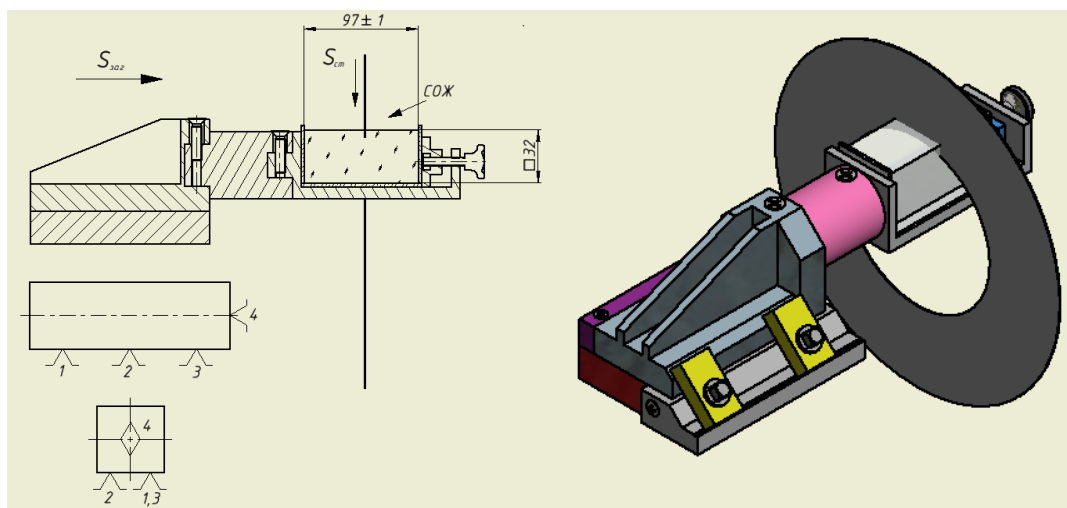


Рисунок 2 – Распиливание



Рисунок 3 – Станок IDS 22: G&N

Используя алмазный круг АОК и специализированные зажимные тиски, производится кругление заготовки для получения первого габаритного размера линзы, заготовка закрепляется на вращательном устройстве [1]. Кругление осуществляется с помощью алмазного круга по всей поверхности. Для этой операции используем станок ОШ-510Ф2 (рисунок 4).

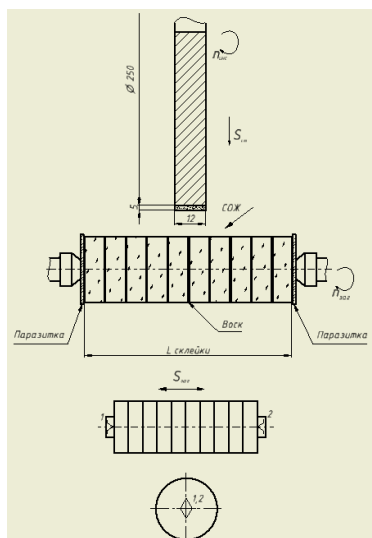


Рисунок 4 – Станок ОШ-510Ф2

Диаметр заготовки контролируется с помощью измерительного инструмента: штангенциркуля или микрометра.

Для того чтобы провести шлифование поверхности, деталь крепится в цангу (рисунок 5). Цанга – приспособление для зажима в цанговый патрон цилиндрических предметов.

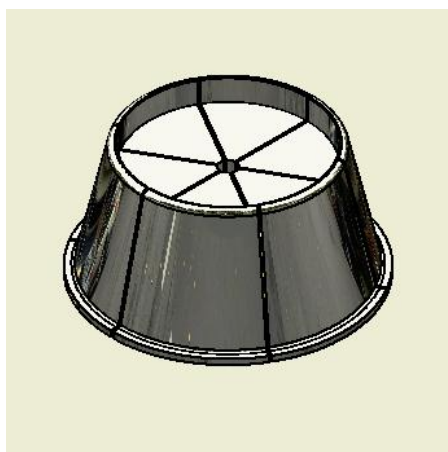


Рисунок 5 – Цанга

Для операций шлифования радиуса поверхности (рисунок 6), фасетирования и центрирования используется универсальный шлифовальный станок SM 60 CNC-TC (рисунок 7) компании OptoTech. Он предназначен для комплексной обработки сферической оптики [2]. Станок, автоматизированный, для него задают программу, с помощью которой станок выполняет операции. Для операции шлифование, деталь закрепляют в цанге. Цангу подбирают под диаметр линзы. Цанга с заготовкой движется по вертикали, горизонтали, а также имеет вращательное движение. В операции используются два алмазных инструмента с разной зернистостью. Шлифование производится вращательным движением инструментов и движением

заготовки. Инструменты двигаются по вертикали, под углом, горизонтально и также имеют вращательное движение. Фасетирование и центрирование производится также двумя алмазными инструментами по заданной программе.

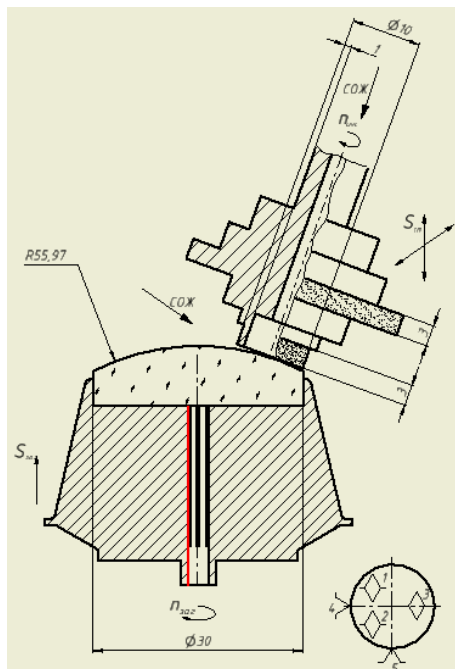


Рисунок 6 – Шлифование



Рисунок 7 – Станок SM 60 CNC-TC

Для контроля радиуса кривизны обработанной поверхности можно использовать кольцевой контактный сферометр. На проверяемую деталь накладывается кольцо, диаметр рабочей кромки которого $2r$ известен с высокой точностью. Во втулке кольца помещен стержень измерительного прибора. С его помощью определяется высота h шарового сегмента, основанием которого служит плоскость рабочей кромки кольца. Радиус R проверяемой поверхности определяют по формуле:

$$R = r^2 / 2h + h / 2$$

Полирование сферических оптических поверхностей производится по схеме свободной притирки (рисунок 8).

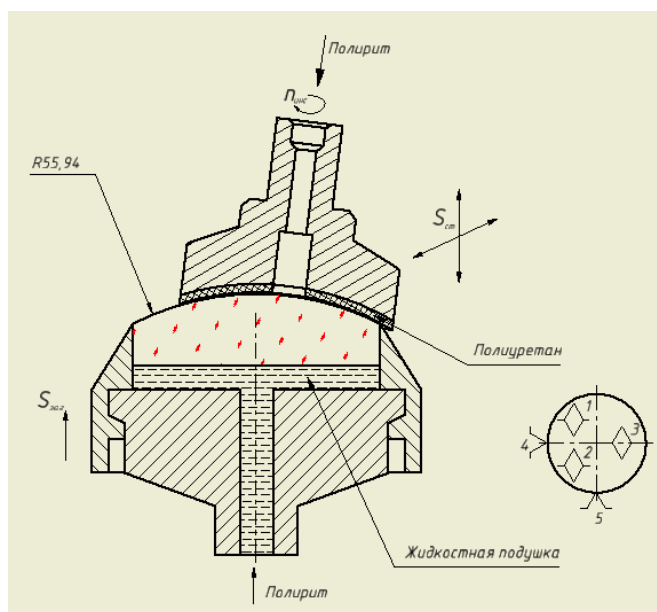


Рисунок 8 – Полирование

Инструмент для полирования отличается от шлифовальника тем, что на его рабочую поверхность наносится слой материала, обладающего помимо упругих свойств заметной пластичностью и вязкостью (полиуретан, замша). Полирование осуществляется с помощью технологии HydroSpeed (рисунок 9), при которой для поджима линзы к полировальнику не используется классический мембранный патрон. Вместо этого линза прижимается к полировальнику потоком полировальной суспензии. При этом, бачок для полировальной суспензии оснащается дополнительным насосом высокого давления, который вместо воздуха подает через шпиндель изделия полировальную суспензию. Линза, таким образом, лежит на жидкостной подушке и одновременно самоцентрируется в патроне благодаря омывающему её потоку полировальной суспензии. Операция проводится на том же станке OptoTech SM60 CNC-TC [2].

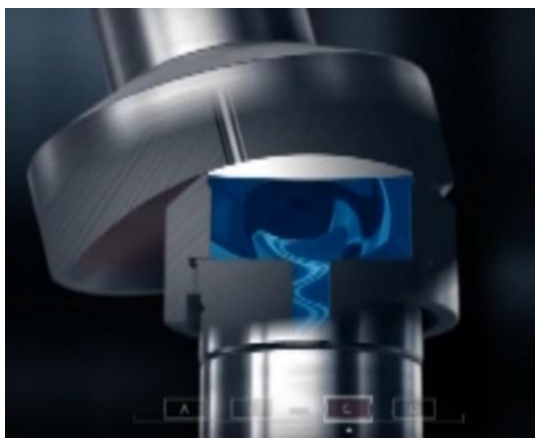


Рисунок 9 – Технология HydroSpeed

Эта технология имеет следующие ключевые преимущества:

1. Давление поджима линзы распределяется абсолютно равномерно по ее нижней стороне. В классическом мембранном патроне распределение давления на линзу часто имеет вид кривой Гаусса, что ведет к деформации линзы. Технология HydroSpeed® обеспечивает значительно меньшую деформацию, и как следствие более высокую точность обработки, порядка $N1$ ($\Delta N0,2$).

2. При использовании классического мембранного патрона давление поджима передается на линзу пневматически через мембрану. Воздух в данном случае играет негативную роль теплоизолятора. Тепло возникающее в процессе полировки в линзе не может отводиться, за счет чего происходит дальнейшая деформация линзы. Этот эффект наблюдается, если линзу сразу после полировки проконтролировать на интерферометре и, наблюдая за изменением интерференционной картины. При работе по технологии HydroSpeed® линза, наоборот, со всех сторон омывается полировальной суспензией, постоянная температура которой поддерживается в бачке с интегрированным термостатированием. Полировальная суспензия намного лучше абсорбирует тепло, и температурный градиент линзы остается постоянным.

3. Решающее преимущество технологии HydroSpeed® кроется, однако, в отпадающей необходимости покрывать первую сторону линзы защитным лаком, т.к. механический контакт линзы и крепежной оснастки полностью отсутствует.

Предельно допустимые отклонения N , ΔN поверхности (предельное допустимое отклонение стрелки кривизны детали N и предельное допустимое отклонение формы оптической поверхности ΔN) контролируется после полирования при помощи интерферометра OptoTech OWI 100 ECO Invers [2].

Контроль чистоты поверхности производится при помощи микроскопа. Классы чистоты поверхностей устанавливают по допускаемым размерам, числу и

расположению царапин и точек на поверхности оптической детали. Чистоту поверхности устанавливают в зоне, ограниченной окружностью светового диаметра.

Контроль R_z шероховатости производится профилометром. Принцип работы профилометров основан на измерении микронеровностей поверхности путем ощупывания ее алмазной иглой. При перемещении иглы по поверхности обработанной детали игла вследствие неровностей поверхности колеблется вдоль своей оси, причем частота и амплитуда ее колебаний соответствуют шагу и высоте неровностей. Прибор имеет электрическое устройство со специальными датчиками, с помощью которого автоматически определяет величину среднего квадратического отклонения от средней линии профиля обработанной поверхности детали.

Для использования, изготовленной оптической детали в коллимирующем картридже лазерной головки, необходимо точно измерить радиус кривизны, для этого используется интерферометр, работающий по оптической схеме Физо (рисунок 10).

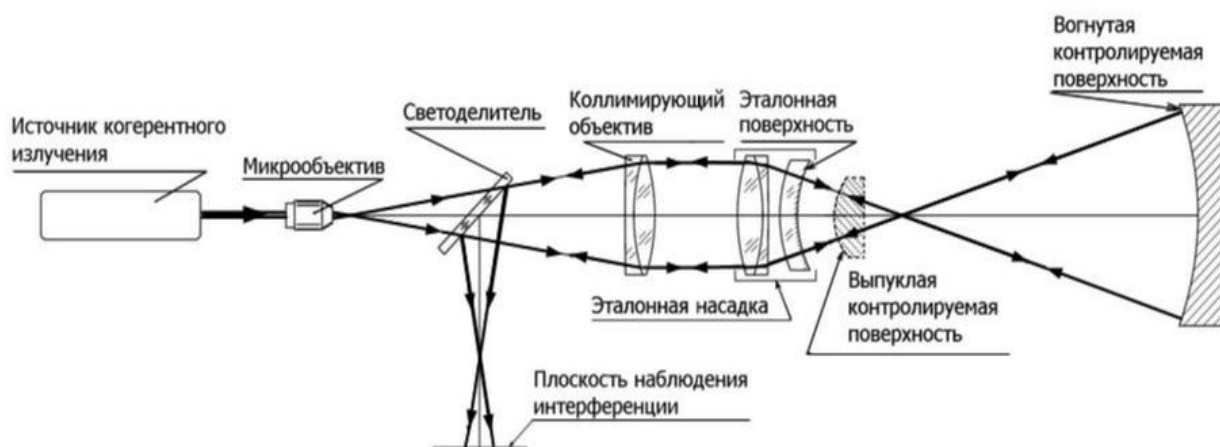


Рисунок 10 – Схема интерферометра Физо

Интерферометр работает следующим образом: выходящий из источника когерентного излучения расходящийся пучок лучей после прохождения светоделителя преобразуется коллимирующим объективом в параллельный пучок, а затем отражается от эталонной поверхности и поверхности исследуемой детали. Эти две волны интерферируют на поверхности светоделительной пластины, и отраженная интерференционная картина через окуляр попадает на приемное устройство. Конструкция представлена на рисунках 11-13[3].

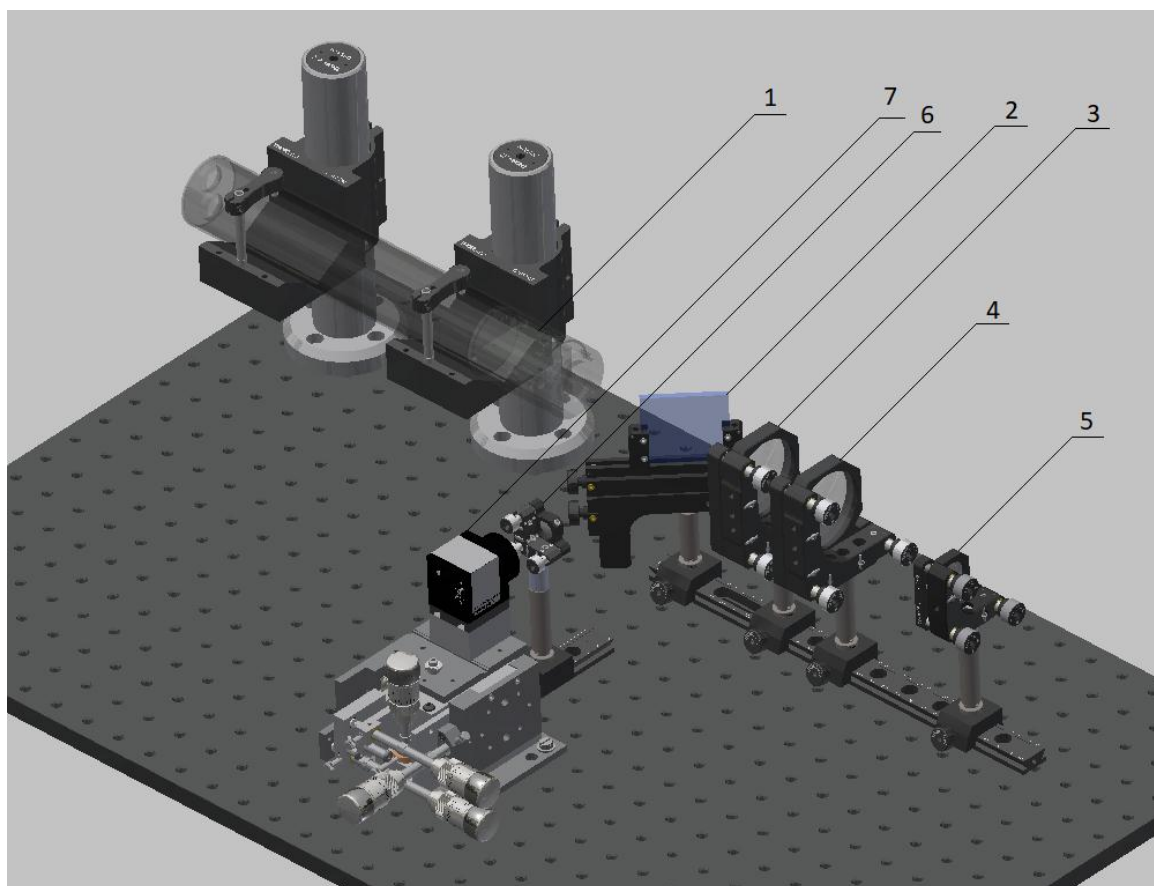


Рисунок 11 – Конструкция прибора (1- Источник излучения, 2- Светоделитель, 3- Объектив, 4- Эталон, 5- Контролируемая деталь, 6- Объектив, 7- Камера)

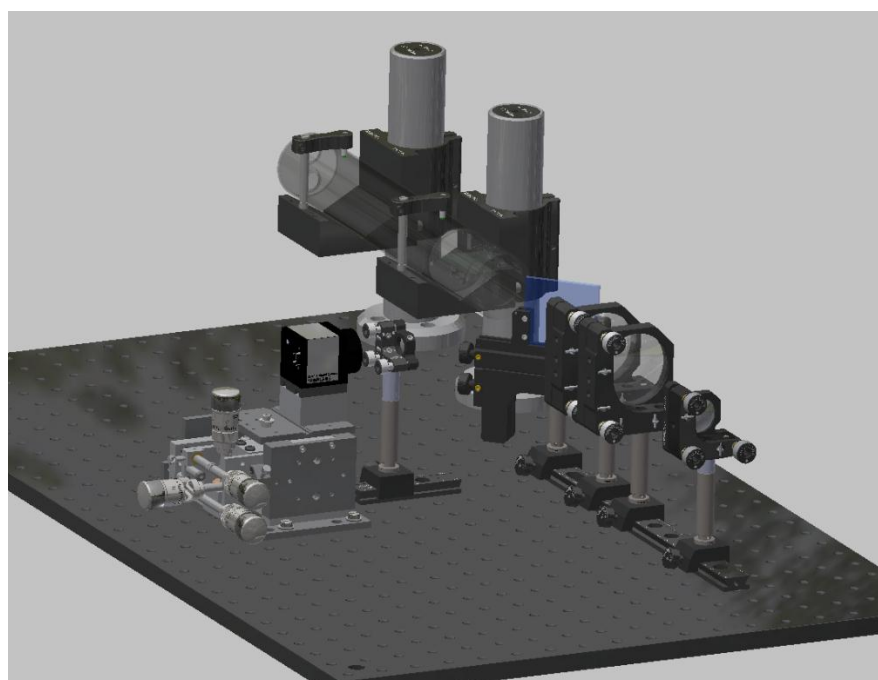


Рисунок 12 – Конструкция прибора

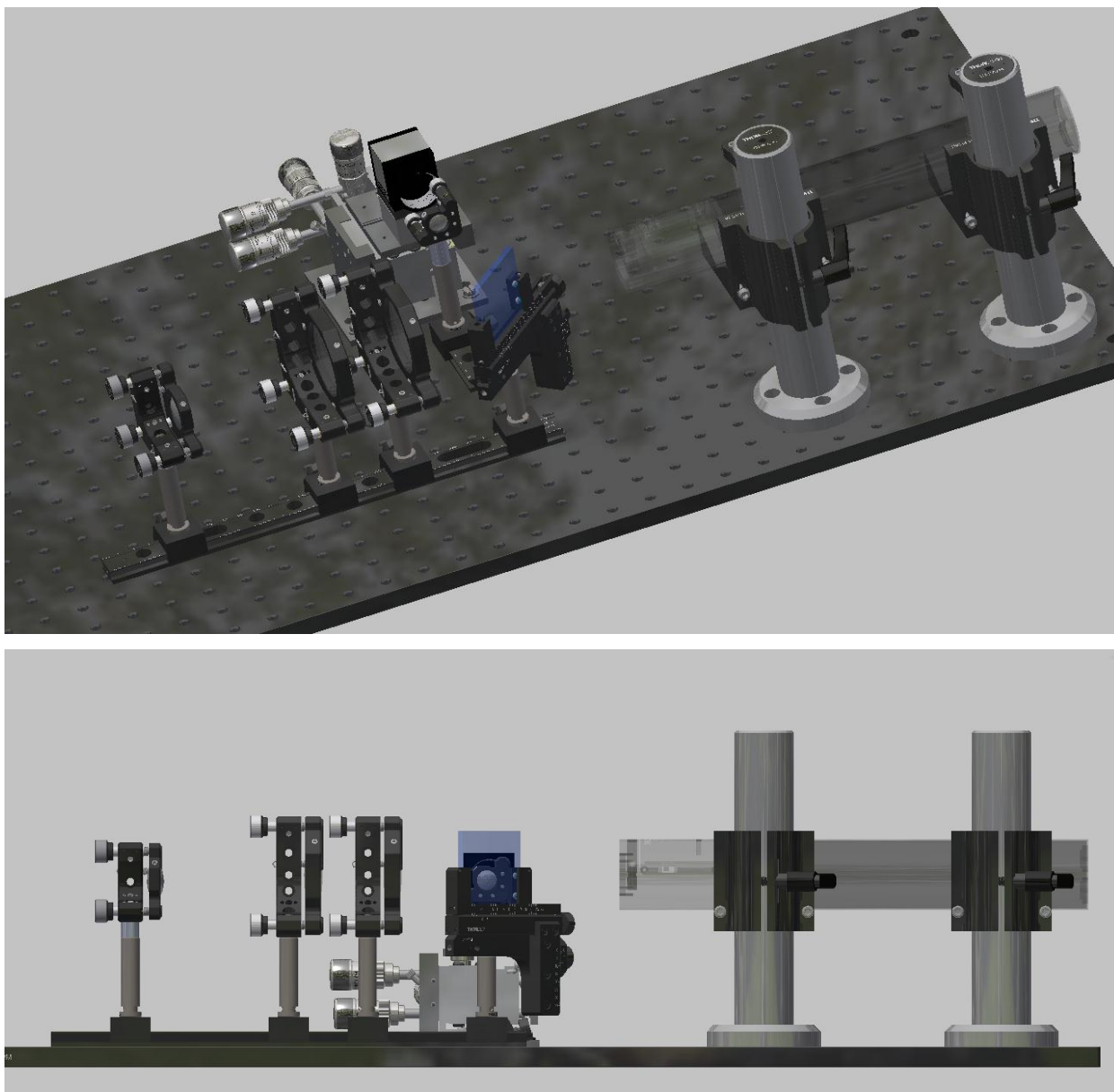


Рисунок 13 – Конструкция прибора

Альтернативный вариант контроля радиуса кривизны – метод изменения волнового фронта, с применением датчика Шака-Гартмана.

Датчики волнового фронта, типа Шака-Гартмана, позволяют анализировать aberrации регистрируемого волнового фронта, за счет деления последнего на дискретные области, где происходит обработка данных.

Стоит отметить, что датчик волнового фронта определяет искажения волнового фронта относительно исходного плоского (опорного). Каждая микролинза собирает свет, заполняющий ее апертуру, и образует одно фокальное пятно на группе элементов матрицы камеры, которые расположены в фокальной плоскости массива микролинз. Если волновой фронт плоский, все фокальные пятна расположены по центру каждой линзы, совпадающей с оптической осью (рисунок 14).

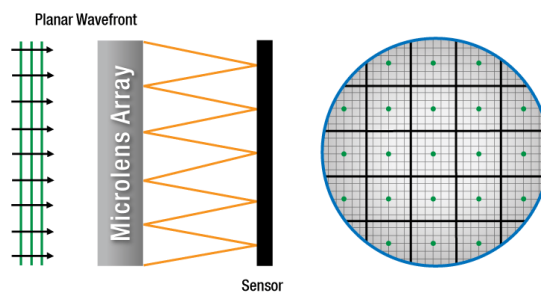


Рисунок 14 – Датчик Шака-Гартмана

В случае, когда волновой фронт искажен аберрациями, фокальные пятна будут смещены от их опорных положений на матрице (рисунок 15).

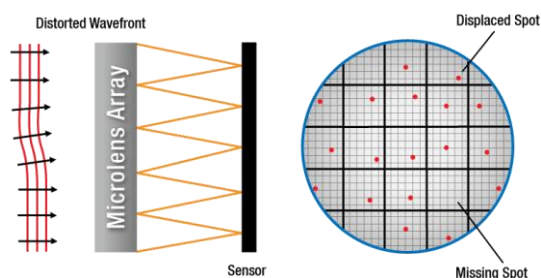


Рисунок 15 – Датчик Шака-Гартмана

Датчик волнового фронта является лишь частью схемы системы контроля. Полная схема системы представлена на рисунке 15 [4].

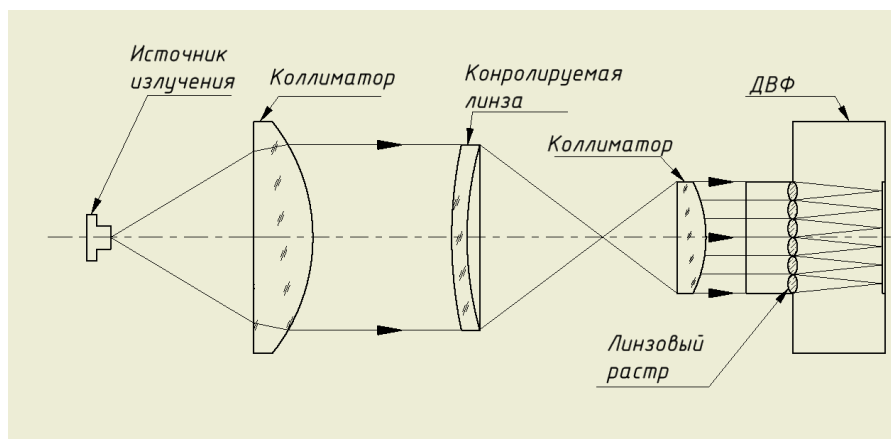


Рисунок 15 – Схема контроля Шака-Гартмана

Данная схема состоит из источника излучения, двух коллиматоров, контролируемой линзы (эталонной линзы), массива микролинз и самого датчика волнового фронта. В качестве источника излучения используется лазерный диод. Принцип работы всей схеме заключается в формировании волнового фронта измеряемой поверхности с помощью источника излучения, и направления этого фронта на массив линз и далее на матрицу чувствительного датчика. На рисунке 16 представлены виды конструкции прибора контроля.

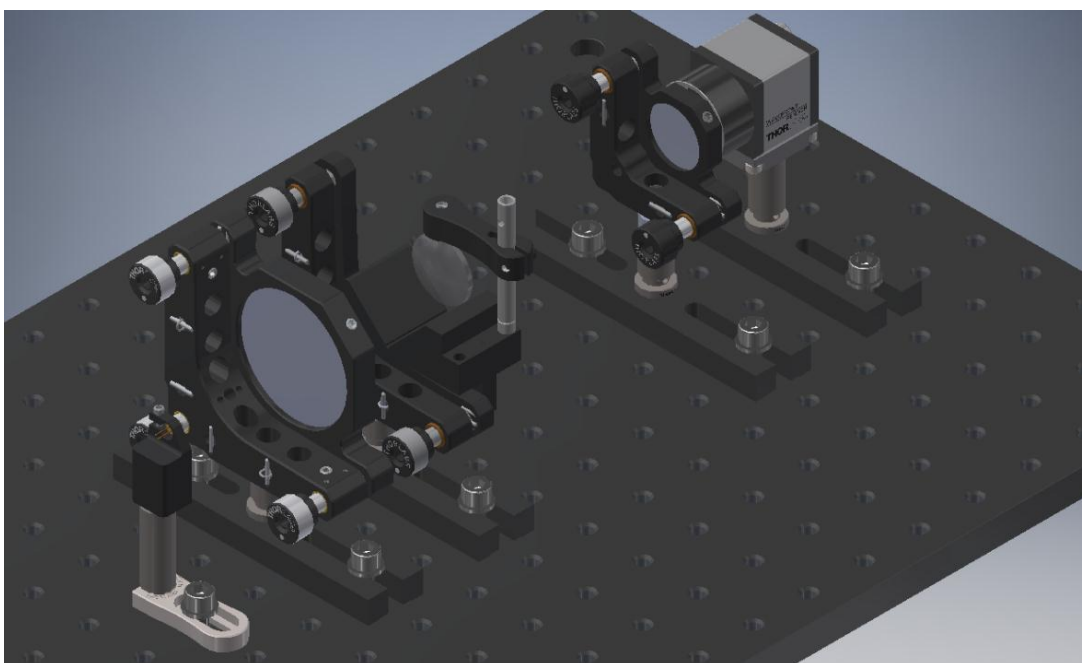
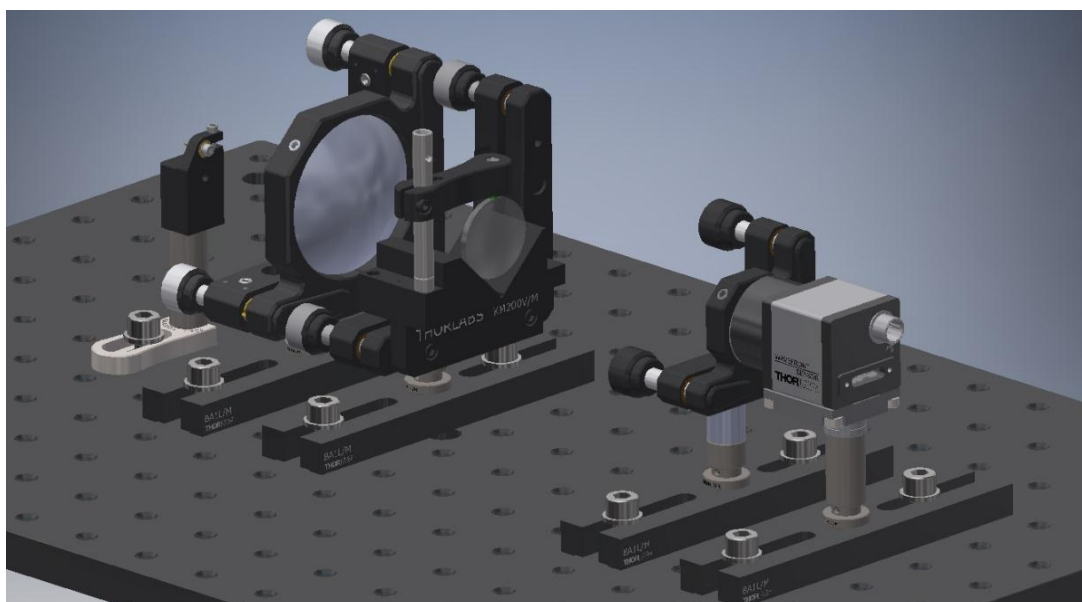
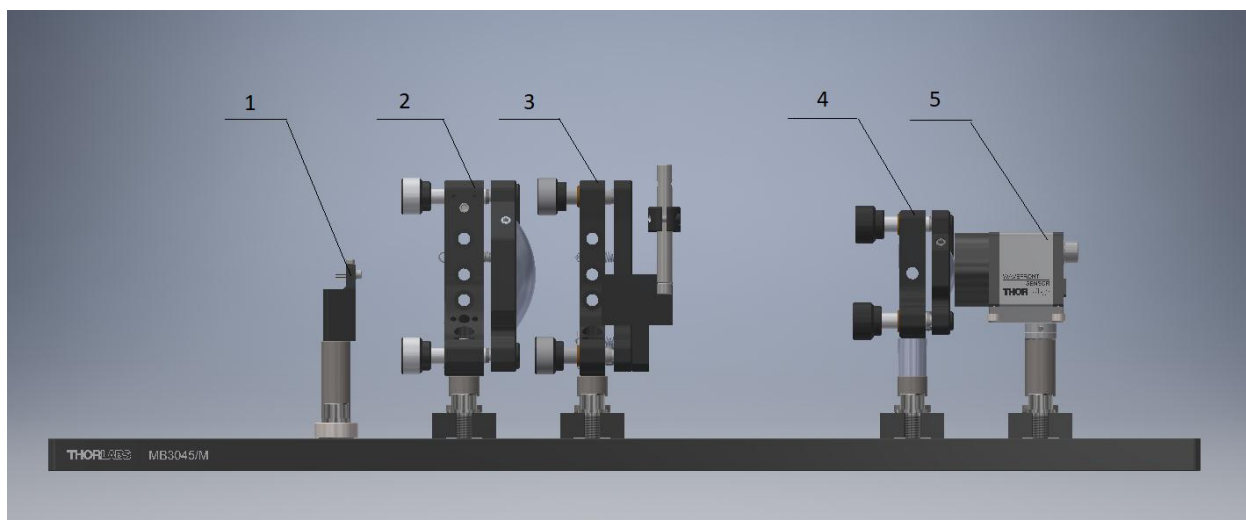


Рисунок 16 – Конструкция прибора. 1 – источник излучения, 2 – коллиматор, 3 – контролируемая линза или эталон, 4 – коллиматор, 5 – датчик типа волнового фронта

Заключение

Из описанного технологического процесса видно, что при использовании достаточного нового оборудования и новых технологий можно добиться хороших результатов в изготовлении оптической линзы: повышение производительности, используя универсальный станок компании OptoTech для комплексной обработки сферической оптики, улучшение качества и повышение точности, используя технологию HydroSpeed, а также минимизирование влияния человеческого фактора на изготовление оптического изделия, путем автоматизации основных операций технологического процесса.

Литература

1. Окатов М.А., Справочник технолога оптика – СПб: Политехника, 2004 г.
2. Optotech. Станки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.optotech.de/ru>
3. Приборы контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zygo.com>
4. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy: WaveFront Sciences, Inc., 14810 Central S.E., Albuquerque, NM 87123.

ВЫБОР ДЛИН ВОЛН ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

М.Л. Белов, С. Ж.-П. Брийан, В.А. Городничев, А.В. Кувшинов

Аннотация: В статье рассмотрена задача лазерного дистанционного зондирования состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения. Приведены спектральные зависимости коэффициентов отражения разных видов растительности и данные о спектральном пропускании земной атмосферы в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. Проведен выбор длин волн зондирования для лазерного дистанционного рефлектотметрического метода контроля состояния растительности в безопасной для зрения ближнем инфракрасном спектральном диапазоне свыше 1,4 мкм. Показано, что результаты лазерного зондирования на двух длинах волн $\sim 1,55$ мкм и $\sim 2,04$ мкм позволяют надежно отличать живые зеленые растения от растений, находящихся в неблагоприятных для развития условиях, сухих растений, растений в осенний период.

Ключевые слова: лазер, дистанционное зондирование, растительный покров, коэффициенты отражения.

CHOOSING OF SOUNDING WAVELENGTHS FOR REFLECTIVE LASER METHOD OF VEGETATION MONITORING

M.L. Belov, S. Briyan, V.A. Gorodnichev, A.V. Kuvshinov

Abstract: Laser remote sounding of vegetation cover using land surface reflection coefficients measurement data is considered. Spectral dependence reflection coefficients of many kinds of plant and data about spectral earth atmospheric transmission in near IR spectral band are given. Choosing of sounding wavelengths for reflective laser method of vegetation monitoring in eye-safe near IR spectral band over 1,4 μm is formed. It is shown that measurement data of laser sounding on two wavelengths $\sim 1,55$ μm and $\sim 2,04$ μm allow reliably distinguish live green plants from plants under the unfavourable conditions, dry plants and plants in autumn time.

Keywords: laser, remote sensing, vegetation cover, reflection coefficients.

Введение

В настоящее время лазерная аппаратура используется для решения многих прикладных задач связи, локации, дистанционного мониторинга окружающей среды и др. [1-3].

Одним из перспективных направлений лазерного зондирования является мониторинг состояния растительности. Загрязнение окружающей среды, недостаток удобрений, неблагоприятные внешние факторы, избыток или недостаток влаги, засоление почвы, болезни и т.п. приводят к невозможности нормального роста и развития растительности. При этом, такие состояния часто сложно идентифицировать на ранних стадиях по внешнему виду растений.

Поэтому актуальным на сегодняшний день является разработка методов и аппаратуры для контроля состояния растительности.

Наиболее эффективным дистанционным методом контроля состояния растений является лазерный флуоресцентный метод [4-8].

Однако, метод лазерно-индуцированной флуоресценции имеет недостаток – из-за небольшой величины сечения флуоресценции для большинства флуоресцентных лидаров дальность зондирования составляет 100-150 м (что приводит к небольшой пространственной полосе сканирования на земной поверхности).

Методы спектрального анализа оптического излучения, отраженного от растительности, позволяют получить информацию о состоянии растительного покрова при большой полосе сканирования.

Наиболее отчетливо характерные особенности отражательной способности растений проявляются при переходе от видимого диапазона спектра к ближнему инфракрасному диапазону. В спектральном ходе коэффициентов отражения растительности в неблагоприятных условиях это будет проявляться в резком падении отражательной способности растений в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне – см. рисунок 1, где показана спектральная отражательная способность здоровых (кривая 1) и поврежденных (кривая 2) листьев [9].

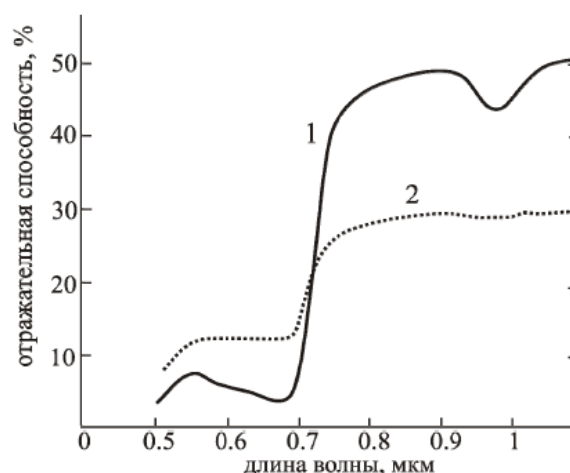


Рисунок 1 – Спектральная отражательная способность здоровых (1) и поврежденных (2) листьев

Таким образом, спектральная зависимость коэффициента отражения растений, находящихся в неблагоприятных для развития растений условиях, в целом имеет более плавный вид (по сравнению со здоровыми растениями) - при переходе от красной к ближней инфракрасной спектральной области «скачок» коэффициента отражения заметно уменьшается.

В настоящее время методы спектрального анализа оптического излучения, отраженного от растительности, являются пассивными. Для оценки состояния растительного покрова они используют специальные комплексные параметры, называемые индексами вегетации (см., например, [10-15]).

Перспективным вариантом аппаратуры оптического диапазона, позволяющей в широком диапазоне погодных условий и в любое время суток проводить мониторинг состояния растительности является лазерная система, использующая рефлектометрический метод контроля состояния растительного покрова.

Лазерная аппаратура мониторинга состояния растительности обладает высокой пространственной разрешающей способностью и может работать при больших высотах полета авиационного носителя, что обеспечивает большую пространственную полосу сканирования на земной поверхности.

Статья посвящена разработке лазерного метода контроля состояния растительности по данным измерений коэффициентов отражения.

1. Постановка задачи

Использование источников лазерного излучения для практических задач всегда связано с опасностью для зрения. При этом, степень опасности для зрения зависит

используемой для дистанционного зондирования длины волны излучения. Лазерное излучение в УФ спектральной области с длинами волн 0,18 - 0,38 мкм и в ближней ИК спектральной области с длинами волн свыше 1,4 мкм воздействует на передние среды глаза и является более безопасным, чем излучение в спектральной области 0,38 - 1,4 мкм, которое воздействует на сетчатку глаза [16-18].

Использование ближнем ИК спектральной области для мониторинга представляется более предпочтительным (ближняя ИК спектральная область является более безопасной для зрения, чем УФ спектральная область 0,18 - 0,38 мкм).

В статье на основе данных спектральной библиотеки коэффициентов отражения разных видов растительности и данных о спектральном пропускании атмосферы проводится выбор длин волн зондирования для лазерного рефлектометрического метода контроля состояния растительности в безопасной для зрения ближней ИК спектральной области свыше 1,4 мкм.

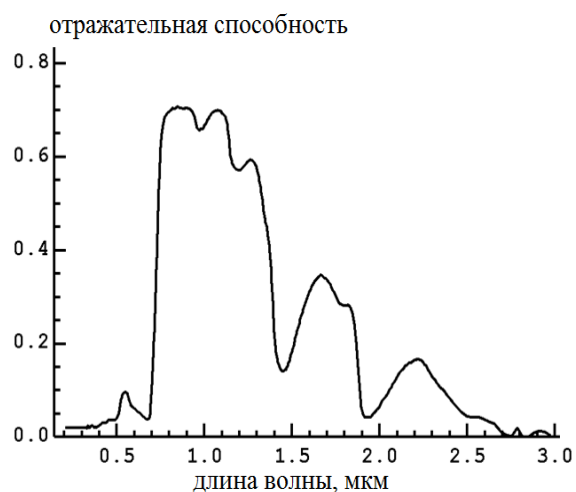
2. Анализ спектральных коэффициентов отражения растительности

В настоящее время существуют доступные данные о спектральных зависимостях коэффициентов отражения растительности (см., например, [19-23].

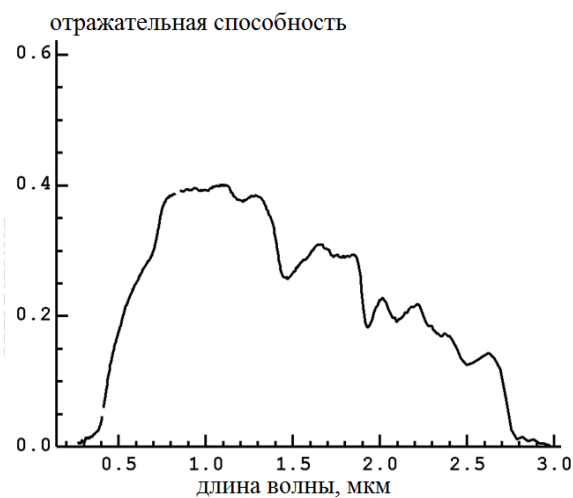
При этом, российские спектральные данные представлены в основном в спектральном интервале от видимой до ближней инфракрасной спектральной области (до 1 мкм) в нецифровом (графическом в виде рисунков) виде. Электронные спектральные библиотеки с российскими спектральными данными в настоящий момент недоступны. Это делает затруднительным использование российских спектральных данных.

Американские спектральные данные представлены в цифровых спектральных библиотеках в графическом и текстовом форматах в широком спектральном интервале – от ультрафиолетовой (от 0.3 мкм) до ближней инфракрасной спектральной области (2-3 мкм). Это позволяет использовать их для анализа, интерпретации и сравнения эффективности работы различных методов контроля состояния растительного покрова.

Примеры спектров отражения разных видов растительности (как в нормальном состоянии в различные периоды вегетации, так и в стрессовом состоянии, вызванном болезнью растений) приведены на рисунках 2-5 [23].



а)



б)

Рисунок 2 – Спектр отражения растущей зеленой (а) и сухой (б) травы



а)



б)

Рисунок 3 – Спектр отражения зеленого живого (а) и сухого (б) листа дуба

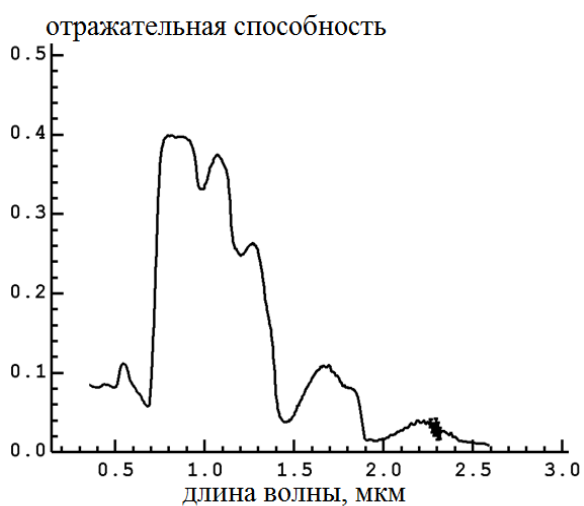


Рисунок 4 – Спектр отражения голубой
ели



Рисунок 5 – Спектр отражения
можжевельника

Из рисунков видно, что в нормальных для развития условиях зеленая растительность имеет в спектре отражения достаточно хорошо выраженный локальный максимум в зеленой области спектра (0,52 - 0,58 мкм). В ближнем ИК спектральном диапазоне (на длинах волн более 0,75 мкм) коэффициент отражения зеленой растительности в нормальных для развития условиях достигает максимума.

В неблагоприятных для развития условиях или при изменении периода вегетации происходит изменение спектра отражения растительности – при переходе к ближнему ИК диапазону уменьшается максимальный «перепад» коэффициента отражения.

Изменения в спектрах отражения растительности в неблагоприятных для развития условиях или при изменении периода вегетации для ближнего ИК (свыше 1,4 мкм) диапазона спектра не так очевидны. Их можно обнаружить только по результатам обработки спектров отражения.

Отметим также, что с увеличением длины волны в области более 1,4 мкм коэффициенты отражения в целом уменьшаются (хотя и имеют два локальных максимума в диапазонах 1,5 - 1,8 и 2 - 2,4 мкм) и на длинах волн более 2,5 - 2,7 мкм величина коэффициентов отражения может быть уже очень небольшой.

3. Анализ спектрального пропускания атмосферы

Проведем теперь анализ спектрального пропускания атмосферы в ближнем инфракрасном диапазоне (см. рисунок 6).

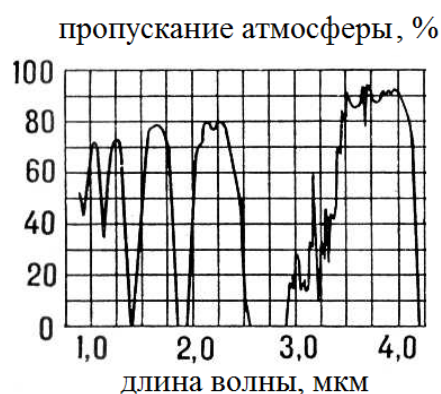


Рисунок 6 – Пропускания атмосферы в ближнем инфракрасном диапазоне

Рисунок 6 показывает наличие двух окон с высокой прозрачностью земной атмосферы в диапазонах 1,55 - 1,75 мкм и 2 - 2,4 мкм.

Более подробная картина спектрального пропускания атмосферы в диапазонах 1,55 - 1,75 мкм и 2 - 2,4 мкм показана на рисунках 7 и 8 [24]).

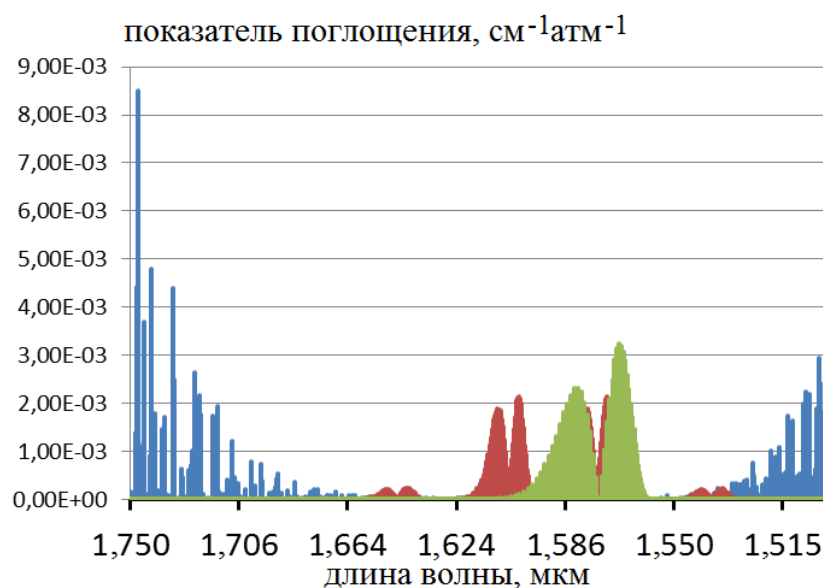


Рисунок 7 – Спектральная зависимость поглощения атмосферных газов в приземном слое атмосферы в диапазоне 1,5 – 1,75 мкм

На рисунках 7 и 8 – показатели поглощения атмосферных газов (имеющих в этих диапазонах линии поглощения). Синим цветом на рисунках 6 и 7 показаны линии поглощения воды, красным – двуокиси углерода, зеленым – окиси углерода.

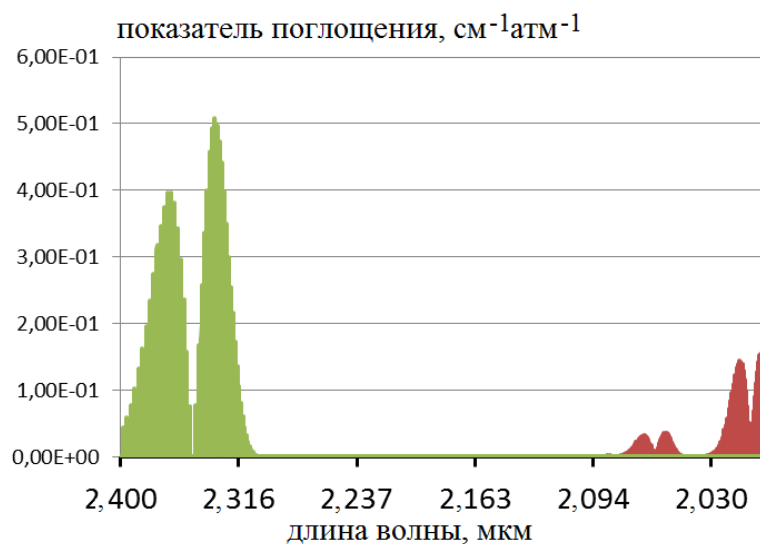


Рисунок 8 – Спектральная зависимость поглощения атмосферных газов в приземном слое атмосферы в диапазоне 2 – 2,4 мкм

Рисунки 7 и 8 позволяют еще более сузить наиболее приемлемые (с точки зрения пропускания атмосферы) спектральные диапазоны для выбора длин волн зондирования – узкие диапазоны около 1,55 и 1,63 мкм и диапазон 2,03 - 2,3 мкм.

4. Выбор длин волн зондирования для лазерного рефлектометрического метода контроля состояния растительности

Для оценки состояния растительного покрова оптическими пассивными методами используются индексы вегетации. Наиболее используемый индекс вегетации NDVI использует значения коэффициентов отражения в двух спектральных диапазонах – в красном и ближнем ИК (до 1 мкм).

Для наиболее простого варианта лазерного рефлектометрического метода естественно выбрать тоже две длины волны зондирования – λ_1 около длин волн 1,55 мкм или 1,63 мкм, а λ_2 в диапазоне 2,03 - 2,3 мкм.

В качестве индекса вегетации $V = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)}$ (растение в нормальных или в неблагоприятных условиях) возьмем отношение коэффициентов отражения растительностью на выбранных длинах волн зондирования.

Примеры математическое моделирования для 5 разных растений показаны на рисунках 9 - 13 (λ_1 принималась равной 1,55 мкм). На рисунках показаны значение индекса вегетации V для разных длин волн λ_2 из диапазона 2,01 - 2,2 мкм (на длинах волн больших 2,2 мкм результаты становятся хуже). Синие столбики на всех рисунках соответствуют здоровым зеленым растениям, а красные – сухим растения или растениям желтого цвета (в осенний период).

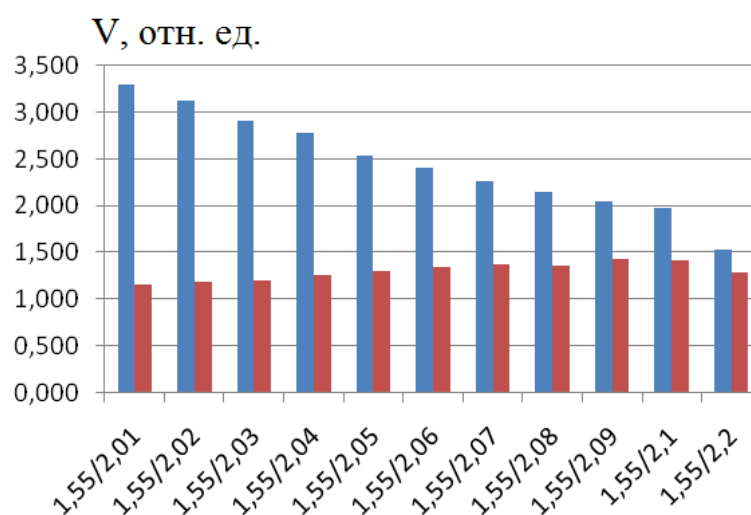


Рисунок 9 – Значение индекса вегетации V для газонной травы

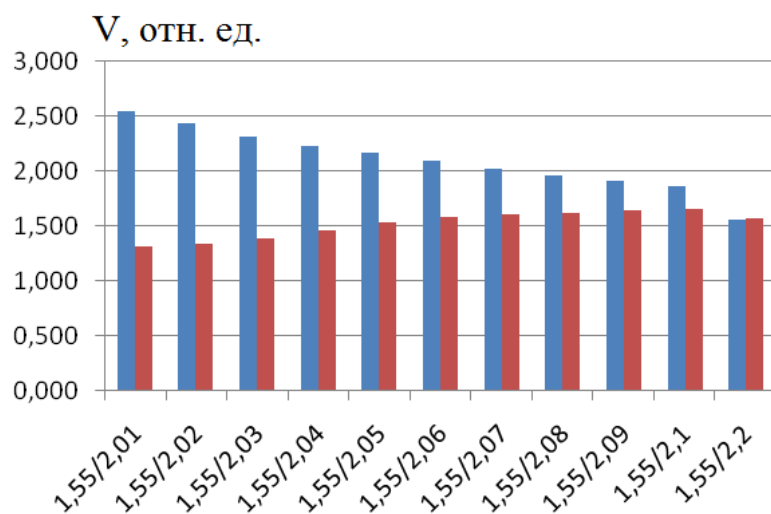


Рисунок 10 – Значение индекса вегетации V для листьев дуба

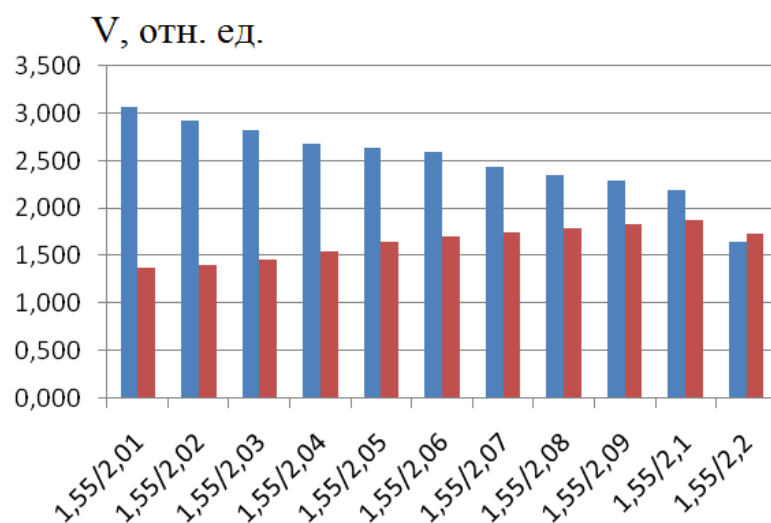


Рисунок 11 – Значение индекса вегетации V для листьев ивы

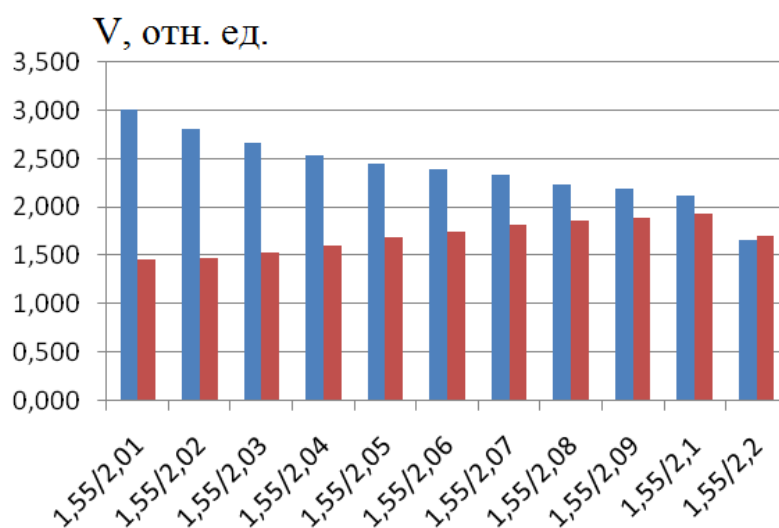


Рисунок 12 – Значение индекса вегетации V для сосны

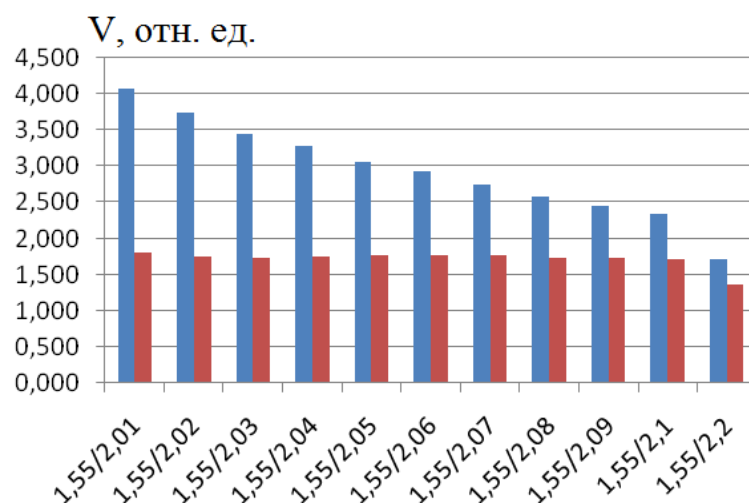


Рисунок 13 – Значение индекса вегетации V для листьев молочая

Анализ рисунков 8 - 13 показывает, что наилучшим (с точки зрения пропускания атмосферы и отличия индекса вегетации V) вариантом для длины волны зондирования λ_2 является длина волны $\sim 2,03 \dots 2,04$ мкм.

На рисунке 13 для выбранных длин волн зондирования $\lambda_1 = 1,55$ мкм и $\lambda_2 = 2,04$ мкм приведены значения индекса вегетации V для растений из базы данных [23].

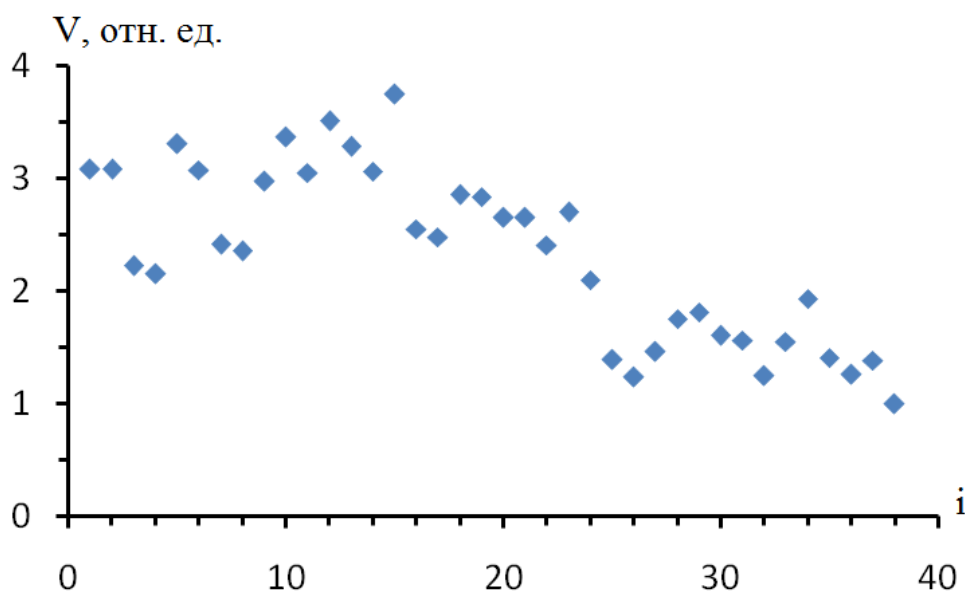


Рисунок 14 – Значения индекса вегетации V для растений из базы данных [23]

На рисунке 14 по вертикальной оси отложены результаты расчетов индекса вегетации V , а по горизонтальной оси – номер i спектра отражения растений в созданной базе данных. Номера 1-24 – зеленые растения, лиственные или хвойные деревья в нормальном состоянии (1,2,22 – осина с разных участков, 3 – дуб, 4 – лох узколистный, 5 – ель голубая, 6 – ель Энгельмана, 7 – пихта, 8 – можжевельник, 9 -15 – молочай с разных участков, 16 – сосна скрученная широкохвойная, 17 – орех, 18,19 –

газонная трава разного вида, 20 – ива, 21 – клен, 23 – сосна, 24 – хвойные деревья и луг), номера 25-38 – сухие растения, растения в осенний период и т.п. (25 – сухие листья полыни, 26,37,38 – сухая трава, 27 – сухой лист дуба, 28,29,34 – молочай с красными или оранжевыми листьями в осенний период, 30 – сосна скрученная широкохвойная сухие зеленые иголки, 31 – сосна скрученная широкохвойная сухие коричневые иголки, 32 – коричневая сухая высокая трава, 33- сухие листья ивы, 35 – сухое растение перекасти-поле, 36 – сухая ива).

Рисунок показывает, что выбранные длины волн лазерного зондирования $\lambda_1=1,55$ мкм и $\lambda_2=2,04$ мкм в большинстве случаев позволяют надежно отличать живые зеленые растения от растений, находящихся в неблагоприятных для развития условиях, сухих растений, растений в осенний период.

Заключение

Статья посвящена разработке лазерного дистанционного метода контроля состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения. Приведены спектральные зависимости коэффициентов отражения разных видов растительности и данные о спектральном пропускании земной атмосферы в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. Проведен выбор длин волн зондирования для лазерного дистанционного рефлектометрического метода контроля состояния растительности в безопасной для зрения ближнем инфракрасном спектральном диапазоне свыше 1,4 мкм. Показано, что результаты лазерного зондирования на двух длинах волн $\sim 1,55$ мкм и $\sim 2,04$ мкм позволяют надежно отличать живые зеленые растения от растений, находящихся в неблагоприятных для развития условиях, сухих растений, растений в осенний период.

Литература

1. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. М.: МГТУ, 2013. 478 с.
2. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В.Стрелков. М.: МГТУ, 2010. 572 с.
3. Weitkamp C. Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. – Berlin: Springer, 2005. – 460 p.
4. Gouveia-Neto A.S., Silva E.A., Oliveira R.A., Cunha P.C., Costa E.B., Câmara T.J.R., Willadino L.G. Water deficit and salt stress diagnosis through LED induced chlorophyll fluorescence analysis in *Jatropha curcas* L. oil plants for biodiesel // Proc. of SPIE. 2011. V. 7902. P. 79020A-1 - 79020A-10.

5. Афонасенко А.В., Иглакова А.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Прокопьев В.Е. Лабораторные и лидарные измерения спектральных характеристик листьев березы в различные периоды вегетации // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 237-243.
6. Hedimbi M., Singh S., Kent A. Laser induced fluorescence study on the growth of maize plants // Natural Science. 2012. V.4, N 6. P. 395-401.
7. Yanga J., Gong W., Shia S., Dua L., Suna J., Song S. Laser-induced fluorescence characteristics of vegetation by a new excitation wavelength // Spectroscopy letters. 2016. V. 49. N 4. P. 263–267.
8. Fedotov Yu.V., Bullo O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Experimental research of different factors influencing on stability of laser induced fluorescence spectra of plants // Proc. of SPIE. 2017. V. 10466, P. 1-5.
9. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 148 с.
10. Crippen R. E. Calculating the Vegetation Index Faster // Remote Sensing of Environment. 1990. V. 34. P. 71-73.
11. Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) // Remote Sensing of Environment. 1994. V. 48. P. 119-126.
12. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment . 2002. V. 83 . P. 195-213.
13. Zygielbaum A.I., Gitelson A.A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize // Geophysical research letters. 2009. V. 36. P. 1-4.
14. Vina A., Gitelson A. A., Nguy-Robertson A. L., Peng Y. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. P. 3468-3478.
15. Ahmad F. Spectral vegetation indices performance evaluated for Cholistan Desert // Journal of Geography and Regional Planning. 2012. V. 5(6). P. 165-172.
16. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. ГОСТ 31581-2012. М.: Стандартинформ, 2013.
17. Mayor S.D., Spuler S.M., Morley B.M. Scattering eye-safe depolarization lidar at 1.54 microns and potential usefulness in bioaerosol plume detection // Proceedings of SPIE. 2005. V. 5887. P. 137-148.

18. Corbett J., Woods M. UV laser radiation: skin hazards and skin protection controls. // International Laser Safety Conference. 2013. Paper #303. P. 1-8.
19. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.-Л.: АН СССР, 1947. 272 с.
20. Кондратьев К.Я., Федченко Н.П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. 290 с.
21. Толчельников Ю. С. Оптические свойства ландшафта. Л.: Наука, 1974. 252 с.
22. Johns Hopkins University Spectral Library. Режим доступа: https://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jhu_desc (дата обращения 12.01.2019).
23. USGS Digital Spectral Library 06. Режим доступа: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06> (дата обращения 12.01.2019).
24. Rothman L.S., Gordon I.E., BarbeA., Benner D.Chris, Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., DanaV., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., LacombeN., Lafferty W.J., MandinJ.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., NikitinA.V., Orphal J., Pereva-lovV.I., PerrinA., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., TothR.A., Vandaele A.C., Auwera J. Vander. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2009. V. 110, N 9. P. 533-572.

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО МАТРИЧНОГО ПРИЕМНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗВЕЗДНЫХ ВЕЛИЧИН

Белан А. Р., Пясецкий В. Б., Евстафьева А. Д.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Аннотация: В данной статье представлен способ определения звёздных величин с помощью мультиспектральных (далее – МС) сенсоров. Рассмотрена зависимость результатов измерения от характеристик сенсора, таких как чувствительность, квантовая эффективность, рабочий спектральный диапазон, а также от характеристик применяемой оптической системы. В качестве примера приведен результат расчета порогового потока для типовой МС матрицы.

Ключевые слова: мультиспектральный сенсор, звездная величина, квантовый поток.

APPLICATION OF MULTISPECTRAL MATRIX LIGHT SENSOR FOR MEASURING STAR VALUES

Belan A. R., Pyasetsky V. B., Evstafieva A. D.

Bauman Moscow State Technical University

Abstract: The article presents measurement method for star values magnitudes by multispectral (MS) sensors. It worded the dependence of the measurement results from the sensor characteristics, such as sensitivity, quantum efficiency, working spectral range, as well as on the characteristics of the used optical system used. For example, the result of the calculation of the threshold flow for a typical MS matrix is given.

Keywords: multispectral sensor, star value, quantum flow.

Введение

Для характеристики блеска звезд и других небесных светил (планет, астероидов, Солнца и Луны) разработана шкала звездных величин.

Визуальная звездная величина указывает поток излучения вблизи наблюдателя, т. е. наблюдаемую яркость небесного источника, которая зависит не только от реальной мощности излучения объекта, но и от расстояния до него.

Визуальную звездную величину определяют как

$$m = -2,5 \cdot \lg \left(\frac{E_1}{E_2} \right),$$

где параметр “-2,5” – коэффициент Погсона, E_1 – освещённость, создаваемая исследуемым объектом в плоскости наблюдения, E_2 – освещённость, создаваемая стандартной (эталонной) звездой [1]. На сегодняшний день звездные величины определяются в различных спектральных диапазонах, включая видимое излучение, по спектральному распределению квантовой облученности, которую создает исследуемый астрономический объект в плоскости наблюдения. Звёздная величина указывает не только на видимый диапазон, но также распространяется на инфракрасный и ультрафиолетовый диапазоны излучения. Такой подход позволяет получать большой объем информации.

В зависимости от выбранного спектрального интервала различают несколько фотометрических систем звездных величин [2, 3]: визуальную (центральная длина волны $\lambda_{m0} = 550$ нм), фотографическую (центральная длина волны $\lambda_{pg} = 425$ нм), систему Джонсона - Моргана UBVRI (центральные длины волн: $\lambda_U = 365$ нм, $\lambda_B = 440$ нм, $\lambda_V = 550$ нм, $\lambda_R = 700$ нм, $\lambda_I = 900$ нм), среднеполосную систему Стремгрена *uvby* ($\lambda_u = 350$ нм, $\lambda_v = 410$ нм, $\lambda_b = 467$ нм, $\lambda_y = 547$ нм) и другие. Ширина спектральных интервалов в системе Джонсона – Моргана находится в пределах от 68 нм (для диапазона U) до 240 нм (диапазон I). В системе Стремгрена спектральные интервалы уже (от 16 до 34 нм). Наиболее часто используются фотометрические системы UBV, Стремгрена (*uvby*), а также восьмицветная Вильнюсская фотометрическая система и система DDO. Каждая из них имеет ряд преимуществ и недостатков, но именно на их основе была создана наиболее широкая система классификации звёзд, поэтому именно их целесообразно рассматривать для определения звездных величин.

На сегодняшний день существует большое количество технических систем для измерения звездных величин. У каждой из них можно отметить недостатки, связанные главным образом с большим потреблением энергии, габаритами и весом, сложностью и высокой стоимостью эксплуатации. Поэтому актуальной остается задача разработки более совершенных измерительных систем, предназначенных для решения фотометрических задач в области астрономии.

В настоящее время как перспективные устройства для исследования спектрального распределения излучения астрономических объектов рассматриваются мультиспектральные системы. Отличительной особенностью современных МС систем, работающих в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, является применение матричных мультиспектральных КМОП-приемников излучения, сочетающих высокую квантовую эффективность с большим числом спектральных каналов и высоким спектральным разрешением при миниатюрных размерах. Технология МС сенсоров,

основанная на применении интерференционных фильтров, позволяет реализовать камеры с числом спектральных каналов, например, 224 при разрешении 5,5 нм в диапазоне длин волн 400 - 1000 нм или 8 нм в диапазоне 950 - 1700 нм [4]. Указанные параметры позволяют предположить возможность применения МС систем для измерения звездных величин в фотометрических системах Джонсона – Моргана и Стремгрена. Применение МС сенсоров, работающих в различных спектральных диапазонах, позволяет сделать процесс исследования характеристик астрономических объектов более информативным, в частности, определять их цветовой индекс – разницу между звездными величинами данного объекта в любых двух спектральных полосах.

Постановка и решение задачи

Чтобы определить звёздную величину астрономического объекта, необходимо измерить лучистый поток, падающий на поверхность мультиспектральной матрицы. При этом точность измерения падающего потока излучения зависит от эквивалентного шумового сигнала.

Выходной сигнал N сенсора является суммой 3-х компонентов. Это, прежде всего, полезный сигнал N_c , сигнал, вызванный фоновым излучением неба N_ϕ , а также темновой сигнал $N_{\text{темн}}$, который связан с термоэмиссией носителей заряда в сенсоре. Полезный сигнал N_c пропорционален числу электронов, сгенерированных излучением от астрономического объекта и накопленных в пикселе за время кадра τ . Для каждого узкого интервала $\delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ длин волн падающего излучения сигнал N пропорционален числу фотонов $N_{\text{фот}}(\lambda)$, пришедших в пиксель матрицы за время накопления сигнала τ . Коэффициентами пропорциональности являются значения спектральной квантовой эффективности матрицы $QE(\lambda)$ для средних длин волн $\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ в каждом из рассматриваемых интервалов. Если обозначить функцию спектрального пропускания оптического тракта ОЭС через $r(\lambda)$, а функцию спектрального пропускания атмосферы Земли через $p(\lambda)$, то отклик приемника на сигнал $N(\lambda)$ определяется выражением:

$$N = \tau \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} N_{\text{фот}}(\lambda) QE(\lambda) r(\lambda) p(\lambda) d\lambda$$

Эмпирическим путём было найдено, что при длинах волн близких к 555 нм яркость ясного безлунного ночного неба при наблюдениях с поверхности Земли составляет в зените примерно 21,5 визуальной звездной величины с квадратной секунды. Этой яркости соответствует фотонный поток, равный примерно 10^4 фотонов в секунду на квадратный сантиметр для излучения с длиной волны 555 нм, приходящего

от звезды спектрального класса A0 V нулевой звездной величины на верхнюю границу земной атмосферы в интервале длин волн шириной в 1 нм [5]. Если известны площадь входного зрачка оптической системы измерительного прибора, полуширина кривой спектральной чувствительности и квантовая эффективность, то можно найти сигнал N_ϕ , вызванный фоновым излучением неба.

Для получения полезного сигнала из суммарного выходного сигнала сенсора нужно вычесть фоновый N_ϕ и темновой $N_{\text{темн}}$ сигналы. Следует учитывать и то, что эти величины изменяются во времени и в общем случае являются случайными. В частности, величина темнового сигнала существенно зависит от температуры: при охлаждении матрицы темновой сигнал резко уменьшается. Также необходимо учитывать ошибку, которая возникает в процессе считывания сигнала (шум считывания).

Таким образом,

$$N_c = \tau \left[\left(\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} N_{\text{фот}}(\lambda) QE(\lambda) r(\lambda) p(\lambda) d\lambda \right) - N_\phi - N_{\text{темн}} \right]$$

Если число накопленных полезных электронов N_c превосходит сумму среднеквадратических ошибок полезного и всех паразитных сигналов $N_c \geq \sigma_N$, то в соответствии со свойствами нормального распределения с вероятностью свыше 68 % сигнал, накопленный в этом пикселе, является сигналом от реального астрономического объекта. В остальных случаях вывод о реальности обнаружения сигнала от астрономического объекта окажется ложным. Если число накопленных полезных электронов превосходит $2\sigma_N$, то можно считать, что обнаружение произошло с вероятностью более 95 %. Наконец, если $N \geq 3\sigma_N$, то вероятность обнаружения будет не менее чем 99,7 %.

Полученная информация о полезном сигнале позволяет рассчитать звёздную величину исследуемого астрономического объекта в соответствующей фотометрической системе.

Фотометрические системы обычно классифицируются по ширине полосы пропускания:

- 1) широкая полоса: системы имеют полосы шириной не менее 300 Å;
- 2) средняя полоса: системы имеют полосы от 300 до 100 Å;
- 3) узкая полоса: системы имеют полосы шириной не более нескольких десятков Å.

Система UBВ Джонсона-Моргана применяется наиболее широко. Нулевые точки системы UBВ выбираются таким образом, что для звезды спектрального класса А0, на которую не влияет межзвездное покраснение, соблюдается равенство $U = B = V$. Несмотря на широкое применение, система UBВ имеет ряд недостатков. В частности, коротковолновое отсечение U-фильтра частично определяется земной атмосферой, а не детектором или фильтром. Таким образом, отсечка (и, следовательно, наблюдаемые величины) могут варьироваться в зависимости от высоты, географического положения и атмосферных условий. В таблице 1 приведены основные параметры наиболее распространенных фотометрических систем звездных величин. Источник информации - Astrophysical Quantities [2], за исключением значений для системы JHKLM, которые взяты из Sterken и Manfroid [3], и значений для L, которые взяты из онлайн-документации UKIRT [6].

Т а б л и ц а 1 – Параметры наиболее распространенных фотометрических систем

Система	Полоса	Эффективная длина волны, Å	Спектральная полуширина, Å
Визуальная	m_v	5 500	-
Фотографическая	m_{pg}	4 250	-
Система Джонсона-Моргана	U	3 650	680
	B	4 400	980
	V	5 500	890
	R	7 000	2 200
	I	9 000	2 400
Система Стрёмгрена	u	3 500	340
	v	4 100	200
	b	4 670	160
	y	5 470	240
		Эффективная длина волны, мкм	Спектральная полуширина, мкм
JHKLM	J	1,25	0,38
	H	1,65	0,48
	K	2,2	0,70
	L	3,5	1,20
	L'	3,8	0,6
	M	4,8	5,70

Учитывая характеристики МС КМОП-сенсоров, можно сделать вывод, что практический интерес такие сенсоры могут представлять для работы в фотометрических системах BVRI.

Оценка принимаемого потока

Зная энергию излучения, проходящего через оптическую систему на сенсор за время кадра, можно найти количество принимаемых фотонов. Чтобы определить возможности какой-либо мультиспектральной матрицы в решении поставленной задачи, необходимо сравнить её порог чувствительности с потоком, приходящим от рассматриваемой звезды. Обратимся к таблице 2.

Таблица 2 – Соотношение значений внеатмосферной звёздной величины и квантовой облученности при длине волны 600 нм.

Звездная величина	Фотонный поток, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	Звездная величина	Фотонный поток, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	Звездная величина	Фотонный поток, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	Звездная величина	Фотонный поток, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
0 ^m	$6,0 \cdot 10^{10}$	6 ^m	$2,4 \cdot 10^8$	12 ^m	$9,5 \cdot 10^5$	18 ^m	$3,7 \cdot 10^3$
1 ^m	$2,4 \cdot 10^{10}$	7 ^m	$9,5 \cdot 10^7$	13 ^m	$3,7 \cdot 10^5$	19 ^m	$1,5 \cdot 10^3$
2 ^m	$9,5 \cdot 10^9$	8 ^m	$3,7 \cdot 10^7$	14 ^m	$1,5 \cdot 10^5$	20 ^m	$6,0 \cdot 10^2$
3 ^m	$3,7 \cdot 10^9$	9 ^m	$1,5 \cdot 10^7$	15 ^m	$6,0 \cdot 10^4$	21 ^m	$2,4 \cdot 10^2$
4 ^m	$1,5 \cdot 10^9$	10 ^m	$6,0 \cdot 10^6$	16 ^m	$2,4 \cdot 10^4$	22 ^m	$9,5 \cdot 10^1$
5 ^m	$6,0 \cdot 10^8$	11 ^m	$2,4 \cdot 10^6$	17 ^m	$9,5 \cdot 10^3$	23 ^m	$3,7 \cdot 10^1$

Данные, представленные в таблице 2, соответствуют звёздным величинам, относящимся к спектру В системы UBV Джонсона- Моргана [5].

В качестве примера рассмотрим МС матрицу SNT32 NIR компании Imec. Оценим ее возможности, опираясь на технические характеристики, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики матрицы SNT32 NIR

Параметр	Значение
Тип фильтра	Snapshot Mosaic
Спектральный диапазон, нм	600-1000
Размер пикселя, мкм	5,5
Квантовая эффективность, %	>40
Темновой ток, $\text{e}^-/\text{пиксель}/\text{сек}$ при 25°C	<125
Минимальное время экспозиции, мс	3
Число спектральных полос	32

Найдём минимальный фотонный поток, воспринимаемый матрицей, т. е. поток при отношении сигнал/шум близком к 1, для условной оптической системы. Примем площадь апертуры объектива равной 1 м^2 . Для выбранного объектива (Таблица 4) оценим площадь пятна рассеяния на поверхности матрицы.

Т а б л и ц а 4 – Конструктивные параметры объектива

Номер линзы	Радиус кривизны, мм	Осевое расстояние, мм	Марка стекла
1	7447	84,75	ТК12
	-4246		
2	-22910	100,00	БФ4

Расчёт OPAL показывает, что у такой системы поперечная aberrация составляет $0,0036 \text{ мм}$, а диаметр пятна рассеяния $d_{n.p.} \approx 0,386 \text{ мм}$. Объектив ахроматизирован для длин волн $\lambda_0 = 0,768 \text{ мкм}$, $\lambda_1 = 0,643 \text{ мкм}$, $\lambda_2 = 1 \text{ мкм}$. При этом площадь пятна рассеяния составляет $0,117 \text{ мм}^2$. Очевидно, что пятно занимает некоторое число пикселей

$$n = \frac{A}{S},$$

где A – площадь пятна, S – площадь пикселя. В приведенном примере $n = 3868$. Минимальный воспринимаемый поток можно рассчитать, исходя из формулы:

$$\Phi = \frac{n \cdot Q}{\eta(\lambda) \cdot T_n},$$

где Q – минимальное количество регистрируемых фотоэлектронов, $\eta(\lambda)$ – квантовая эффективность, T_n – время накопления матрицы. Минимальный детектируемый сигнал определяется как

$$Q = \frac{\sigma_d}{\eta(\lambda)},$$

где σ_d – темновой шум приёмника. В данном случае, исходя из технических характеристик матрицы, $\sigma_d \approx 125 \text{ ē}$, $\eta(\lambda) = 40\%$, а T_n примем равным 1 с .

При указанных параметрах при засветке принимаемым излучением полной поверхности матричного приемника минимальное значение регистрируемого фотонного потока будет составлять примерно $3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. То есть можно сделать вывод, что такая система способна зафиксировать космический объект с десятой звёздной величиной (для $\lambda = 600 \text{ нм}$). Следует отметить, что разработка конструкции и расчет оптической системы для работы с МС матричным приемником представляет собой отдельную задачу.

Анализ результатов

Оценка воспринимаемого потока и спектральный диапазон показывают, что КМОП сенсор с интерференционными фильтрами может использоваться для измерения звёздных величин в системе VRI (таблица 1). Но нужно учитывать и то, что применение такого сенсора в более широком спектральном диапазоне сопровождается снижением его квантовой эффективности в граничных спектральных интервалах. Поэтому максимальное значение измеряемой звездной величины для одного и того же приемника зависит от выбора фотометрической системы.

Существуют МС камеры с рабочим спектральным диапазоном, включающим ближнюю область ИК спектра. Совмещение МС камер с разными рабочими спектральными диапазонами позволит увеличить число спектральных каналов, что в свою очередь увеличит информативность такой системы, – например, за счет системы JHKLM.

Заключение

Выполненный анализ чувствительности современных МС матриц показывает, что такие приёмники с увеличением времени накопления при наличии термостабилизации способны фиксировать звёздные величины больше девятой. При этом фотоприемные системы на основе таких сенсоров по сравнению с классическими спектрометрическими системами более просты конструктивно. Рабочий спектральный диапазон МС сенсоров позволяет изучать объекты в различных фотометрических системах, включая инфракрасные. Такие сенсоры имеют большой потенциал и в перспективе могут использоваться при изучении объектов с большими значениями звездных величин.

Литература

1. Миронов А.В. Основы астрофотометрии. Практические основы высокоточной фотометрии и спектрофотометрии звезд, М.: МГУ, 2005. 193 с.
2. C.W. Allen. Astrophysical Quantities. London: Athlon Press, 1973. 322 p.
3. Chr. Sterken, J. Manfroid. Astronomical Photometry - A Guide. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 1992. 272 p. DOI: 10.1007/978-94-011-2476-8_1.
4. Мультиспектральные камеры Specim. Spectral Imaging Ltd. [Сайт]
URL: <http://www.specim.fi/hyperspectral-cameras/> (дата обращения 10.05.2019).

5. С.В. Логунов, А.В. Северенко. Моделирование процесса фотометрирования космических объектов // Разработка и эксплуатация вооружения и военной техники: - СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского.2014. С. 173-180.
6. United Kingdom Infrared Telescope [Сайт]. URL: <http://www.ukirt.hawaii.edu> (дата обращения 10.05.19).