

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский физико-технический институт (государственный  
университет)»  
Физтех-школа аэрокосмических технологий  
Кафедра систем, устройств и методов геокосмической физики

Направление подготовки: 03.03.01 Прикладные математика и физика  
Направленность (профиль) подготовки: Геокосмические науки и технологии

**Обоснование выбора составных частей  
гиперспектрометра для беспилотных летальных  
аппаратов**  
(бакалаврская работа)

**Студент:**  
Климова Мария Анатольевна

**Научный руководитель:**  
Щербина Глеб Артурович

Москва 2022

## 1. Оксана

21 февраля 2022 г., 13:23:26

Вставить примеры статей на не гиперспектральные съемки  
<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=larstech>  
(MSS)

## 2. Оксана

21 февраля 2022 г., 13:23:12

<http://www.sevgigurbuz.com/Papers/RAST2013.pdf>

Alchanatis, V., & Cohen, Y. (2010). Spectral and spatial methods of hyperspectral image analysis for estimation of biophysical and biochemical properties of agricultural crops. Ch. 13. In P. S. Thenkabail, J. G. Lyon, & A. Huete (Eds.), *Hyperspectral remote sensing of vegetation* (pp. 705). Boca Raton, FL: CRC Press

### Введение

Большое количество задач в сфере сельского хозяйства и экологии сделали сегодня особенно актуальными методы дистанционного зондирования Земли.

1 Для многих целей (таких как ...) бывает достаточно съемки RGB или мультиспектральной камерой, однако в некоторых случаях требуется более подробная информация о поглощении и отражении излучения на разных длинах волн - то есть целесообразным становится проведение съемки в гиперспектральном формате.

2 Гиперспектральные данные позволяют судить о некоторых особенностях химического состава снимаемых объектов, что делает их источником ценной для сельского хозяйства информации - по ним можно определить, например, этап жизни растения или болезни, которым оно подвержено.

Очевидно, что одним из важнейших параметров любой камеры является ее пространственное разрешение. Добиться его существенного улучшения можно простым способом - уменьшить расстояние до снимаемого объекта, установив гиперспектрометр не на борт космической станции или самолета, а на БПЛА, высота полета которого может быть гораздо ниже.

Такое решение влечет за собой ряд требований к гиперспектрометру. Прибор должен иметь небольшой вес, небольшие размеры и быть устойчивым к перепадам температур. При этом важно, конечно, сохранить приемлемые оптические характеристики (в том числе спектральные).

Целевой спектральный диапазон 400-850 нм выбран исходя из длин волн, на которых характерно поглощение излучение основными пигментами - хлорофиллом а (550-700 нм в красной зоне), хлорофиллом б (530-670 нм в красной зоне), каротиноидами (до 530 нм) и антоцианами (620 - 700 нм).

Данная работа, таким образом, посвящена начальным этапам разработки (выбору и исследованию оптической схемы, изучению оптических и температурных характеристик составных частей прибора, юстировке на стенде и разработке корпуса) гиперспектральной камеры со спектральным диапазоном, удовлетворяющей вышеописанным требованиям.

### 3. Оксана

22 марта 2022 г., 12:41:34

Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps5  
David J. Mulla

### 4. Оксана

22 марта 2022 г., 18:34:30

Методичка по ГИ

## 1. Теоретическое введение

Одной из важнейших областей применения технологий дистанционного зондирования Земли на сегодняшний день являются задачи точного земледелия.

- 3 Точное земледелие, **зародившееся в середине 80-х годов**, ставит целью использование современных технологий для повышения эффективности сельскохозяйственного менеджмента путем сбора, анализа информации о локальных особенностях полей и растений, анализа этой информации и применения полученных результатов для оптимизации распределения ресурсов (удобрений, воды и так далее) и улучшения качества и объема урожая.

### 1.1. Классификация камер по количеству каналов

Для различных подзадач точного земледелия могут быть использованы различные технологии сбора информации. Можно выделить четыре принципиально разных класса камер, применяемых для ДЗЗ.

Панхроматические - то есть производящие съемку в черно-белом формате. Такие камеры чувствительны ко всем длинам волн видимого диапазона и отражают суммарную интенсивность излучения. По съемкам с использованием таких камер можно различать объекты с разными коэффициентами отражения - например, можно увидеть водные объекты, дороги и поля.

RGB (red, green, blue) - производящие съемку в трех каналах, соответствующих красному, зеленому и синему цвету. Такая съемка позволяет видеть снимаемые объекты так, как со спектральной точки зрения видит их человеческий глаз. Съемка в RGB-диапазоне позволяет различать объекты, которые с точки зрения человека имеют разный цвет.

- 4 Мультиспектральные - производящие съемку на нескольких участках спектра. Возможно выбрать каналы мультиспектральной съемки таким образом, чтобы их линейные или нелинейные комбинации (**вегетационные индексы**) были связаны с определенными биофизическими и биохимическими характеристиками растительного покрова. Перечислим и охарактеризуем наиболее распространенные из них.

- 1) SR (Simple ratio) - простое отношение отражение в ближнем инфракрасном диапазоне к отражению в красной области спектра.

$$SR = R_{NIR}/R_{red}$$

Самый примитивный из индексов, предложен в 1969 году

2) NDVI (normalized difference vegetation index) - нормализованный дифференциальный вегетационный индекс.

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}}$$

5

Индекс, используемый для количественной оценки фотосинтетически активной биомассы. В настоящее время **NDVI - карты** местности используют для оценки развития культур (что позволяет, например, определить оптимальный порядок сбора урожая), засоренности полей, качества посевных работ. Кроме того, мониторинг изменений NDVI позволяет в некоторых случаях заметить зарождение очагов инфекций или появление вредителей.

NDVI хорошо работает в случаях, когда количество биомассы не слишком велико и не слишком мало - в противном случае более эффективны индексы EVI и SAVI.

3) EVI (enhanced vegetation index) - усиленный вегетационный индекс.

$$EVI = \frac{2.5(R_{NIR} - R_{red})}{R_{NIR} + 6R_{red} - 7.5R_{blue} + 1}$$

Модификация NDVI, применяемая в случаях, когда биомассы много.

4) SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) - индекс растительности с коррекцией по почве

$$SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red} + L} (1 + L), 0 < L < 1$$

Модификация NDVI, применяемая в случаях, когда биомассы мало и существенный вклад в яркость пикселя вносит почва.

Использование вегетационных индексов, получаемых из мультиспектральных данных, позволяет получить существенное количество полезной для сельского хозяйства информации. Тем не менее, они не позволяют, например, судить о химических и пигментных особенностях наблюдаемых растений - для этого необходимо использование гиперспектральных данных.

Гиперспектральные камеры - производящие съемку сразу в большом количестве узких каналов, в результате чего получается практически непрерывная зависимость интенсивности излучения от длины волны в каждом пикселе.

Использование гиперспектральных данных подразумевает необходимость работы с большими объемами информации, однако позволяет больше

узнавать о снимаемой поверхности и рассчитывать дополнительные индексы, некоторые из которых мы также перечислим ниже.

1)ARI (anthocynian reflectance index), BGI (biomass growth index), BRI (browning reflection index) - индексы для определения пигментного состава. Позволяют оценить уровень содержания основных пигментов вегетирующей растительной клетки -антоцианов, каротиноидов и хлорофиллов.

$$ARI = \frac{1}{R_{550}} - \frac{1}{R_{700}}$$

$$BGI = \frac{R_{450}}{R_{550}}$$

$$BRI = \frac{R_{450}}{R_{690}}$$

2)PSRI (Plant Senescence Reflectance Index) - индекс для определения стрессового состояния растительности

$$PSRI = \frac{R_{680} - R_{500}}{R_{750}}$$

## 1.2. Классификация носителей

Кроме классификации по количеству каналов, возможна классификация камер по типу носителя. Принципиально типов носителей можно выделить четыре.

- 1) Космические носители
- 2) Авиационные носители
- 3) Наземные носители
- 4) Беспилотные летательные аппараты

Носители первых двух типов позволяют охватывать большие территории, но при этом ограничивают пространственное разрешение, так как съемка ведется с большого расстояния. Кроме того, существенной помехой для таких систем может стать облачность.

Наземные носители не зависимы от облачности и имеют возможность проводить съемку с небольшого расстояния, однако возможность их применения ограничена тем, что далеко не к каждой точке есть возможность подъехать по земле (особенно учитывая необходимость не повредить растения).

БПЛА же имеют возможность проводить съемку с достаточно близкого расстояния не нанося при этом вреда сельскохозяйственным территориям и при этом также не чувствительны к облачности (так как высота их полета

Real-Time Hyperspectral Data  
Transmission for UAV-Based  
Acquisition PlatformsJosé M. Melián \*, Adán Jiménez,  
María Díaz, Alejandro Morales,  
Pablo Horstrand, Raúl Guerra,  
Sebastián López and José F.  
López

обычно ниже, чем высота облаков). Конечно, охват территории у таких носителей небольшой, однако его может быть вполне достаточно для исследования конкретных полей и их участков.

Кроме того, дешевизна и простота запуска БПЛА позволяют чаще снимать интересующие участки местности, что может дать более подробную информацию о динамике процессов.

Учитывая все вышеперечисленные факторы, целесообразным является создание гиперспектрометра, носителем которого будет БПЛА. Такой выбор имеет ряд преимуществ, однако накладывает и некоторые ограничения на размер и массу самого прибора.

### 1.3. Передача и хранение данных

Результатом работы гиперспектрометра в каждый момент времени является гиперкуб данных - кадр снимается в каждом канале.



Dr. Nicholas M. Short, Sr. - NASA <http://rst.gsfc.nasa.gov/>  
Graphic representation of hyperspectral data.

Очевидно, объем данных при этом существенно больше, чем при RGB или мультиспектральной съемке, и работа с подобным потоком данных является отдельной непростой задачей.

Принципиально возможны несколько вариантов ее решения:

- 6 1) Использование алгоритмов сжатия бортовым компьютером и непрерывная трансляция сжатых данных на Землю.

## 7. Оксана

10 апреля 2022 г., 19:27:31

Сюда дописать про вероятностный подход и про субпиксельные технологии в идеале

## 8. Оксана

10 марта 2022 г., 17:14:44

В этом разделе надо будет расписать принцип работы словами и сравнить две схемы (с призмой и с решеткой)

- 2) Запись данных на внешний носитель, находящийся на борту (предполагается, что обработка производится после окончания полета)
- 3) Запись данных на внешней носитель и параллельно трансляция части информации на Землю (например, транслировать можно три канала RGB или определенные вегетационные индексы)

Выбор одной из этих опций определяется тем, насколько необходима и желательна возможность трансляции данных в real-time режиме.

### 7 1.4. Обработка данных

#### 1.5. Перспективы

#### 1.6. Требования к прибору

Сформулируем требования, которым должен удовлетворять в конечном итоге гиперспектрометр.

//спектральное разрешение - чем оно вообще продиктовано? Для того, чтобы различать пигменты, кажется, не нужно различать 1-2 нм.//

//пространственное разрешение - что мы вообще хотим увидеть? //

//Масса и габариты - что влезет на дрон?//

### 8 2. Оптическая схема

Параллельно исследовались два варианта оптической схемы - с дифракционной решеткой и с призмой.

Гиперспектрометр в обеих версиях содержит три одинаковых объектива - это сделано из соображений унификации и взаимозаменяемости деталей. Объективы имеют фокусное расстояние 15 мм и диаметр входного зрачка 4 мм. Каждый объектив состоит из четырех склеек. Используются стекла двух видов - K7 и S-FPL51.

Параллельный пучок света попадает на первый объектив, который собирает его в фокусе, где расположена узкая щель, которая вырезает часть пучка. Прошедшие через щель лучи попадают на второй объектив, который снова формирует параллельный пучок.

Щель должна быть достаточно широкой, чтобы обеспечить приемлемый уровень освещенности, но при этом достаточно узкой, чтобы пучок можно было считать однородным по всей его ширине.

Далее следует элемент, обеспечивающий пространственное разделение излучения с разной длиной волны - либо призма, либо дифракционная решетка.

Призма состоит из трех элементов - центральная часть симметрична относительно оси, параллельной щели и проходящей через центр призмы и изготовлена из стекла S-NPH2.

По краям от центральной части находятся две одинаковых части призмы, изготовленных из стекла S-LAH58Ю. Они расположены так, что призма целиком является симметричной относительно вышеописанной оси.

9 В целом призма имеет форму параллелепипеда со сторонами 9.0х9.0х25.7 мм.

Дифракционная решетка имеет 300 штрихов на миллиметр и представляет собой квадратную пластинку со сторонами 12.72 мм и толщиной 3.27 мм.

Последний из трех объективов собирает параллельные пучки лучей с определенной длиной волны в определенные точки на матрице фотоприемника. Таким образом каждой точке, соответствует целая строка пикселей на матрице фотоприемника - то есть мы получаем информацию об интенсивности излучения в точке в зависимости от длины волны.

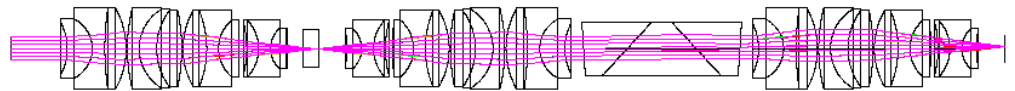


СХЕМА С ПРИЗМОЙ

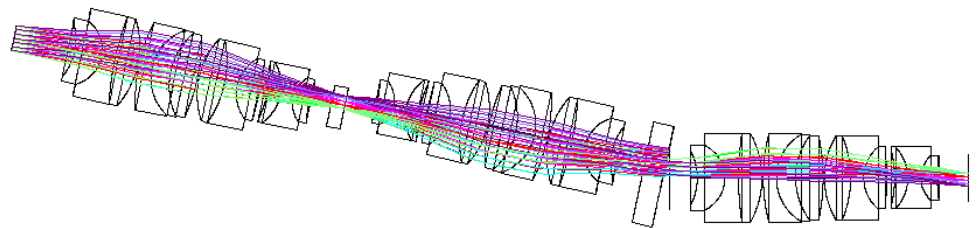


СХЕМА С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ



С точки зрения оптики основной проблемой первого варианта схемы является неравномерное распределение в пространстве точек фокусировки пучков с разными длинами волн. Призма отклоняет лучи на угол, не пропорциональный длине волны - соответственно участки спектра одинаковой ширины будут занимать на матрице разное количество пикселей - то есть для разных длин волн мы получаем существенно разное спектральное разрешение. Кроме того, такая нелинейность, очевидно, создает неудобства на этапе обработки данных.

Схема с дифракционной решеткой, в свою очередь, имеет два основных недостатка - паразитные порядки и необходимость делать схему, содержащую два неколлинеарных участка.

Первая проблема может быть решена правильным выбором диапазона. Вторая же не создает принципиальных проблем, но требует разработки более механически сложного корпуса, что потенциально может привести к повышению сложности юстировки.

В связи с неоднозначностью выбора схемы, было решено:

- 1) исследовать обе схемы на устойчивость к малым децентровкам и наклонам элементов в среде Zemax
- 2) собрать макеты обеих схем и сравнить их оптические характеристики и удобство их юстировки.

### **3. Анализ свойств отдельного объектива**

Для того, чтобы лучше понимать проблемы будущего прибора в целом, необходимо сначала исследовать характеристики отдельных ее частей - в данном случае - объективов, входящих в состав схемы.

#### **3.1 Анализ зависимости характеристик одного объектива от расстояний между элементами**

##### **Описание задачи**

Объектив состоит из четырех крупных блоков, разделенных тремя воздушными зазорами разной толщины. Каждый зазор имеет некоторый расчетный («идеальный») размер. Исследуется влияние неточностей в исполнении зазоров на оптические характеристики объектива.

**10 3.1.1. Зависимость ФПМ от длин воздушных зазоров в объективе****Цель эксперимента**

В данном разделе исследуется влияние неточностей в исполнении зазоров на функцию передачи модуляции объектива.

**Получение данных**

Для каждого набора толщин зазоров снимается ФПМ (тангенциальная и сагитальная) на рабочей частоте (61 штрих на мм) при четырех разных длинах волн (400, 550, 700, 850 нм) и трех углах (0, 3, 6 градусов). Из полученной таким образом серии измерений выбирается значение с наименьшим значением ФПМ. Этот худший показатель и будет целевой функцией. Таблица с данными - приложение 2.

**Обработка данных**

К полученным данным была применена модель линейной регрессии, где входные переменные - это толщины воздушных зазоров, а выходные данные - худший ФПМ. Итоговое уравнение выглядит следующим образом

$$y = b_0 + x_1 * b_1 + x_2 * b_2 + x_3 * b_3$$

$$b_0 = 1.66$$

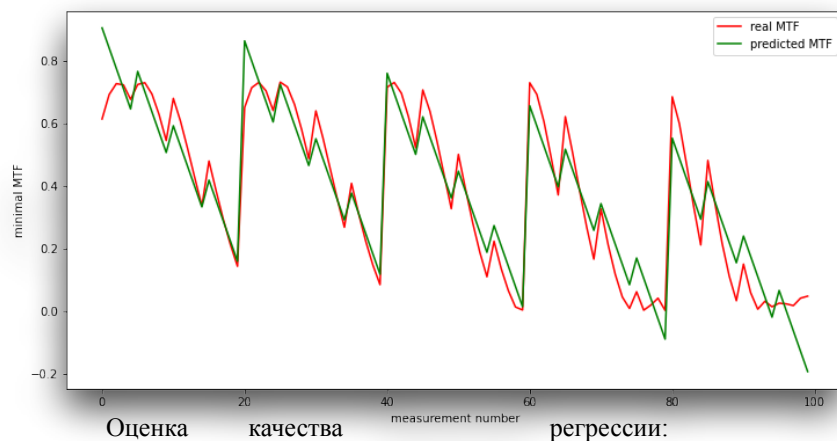
$$b_1 = -0.05$$

$$b_2 = -0.17$$

$$b_3 = -0.65$$

**Визуализация и анализ результатов**

На графике ниже представлено сравнение аналитических результатов, которые дает модель линейной регрессии (зеленый график) и экспериментально полученных данных (красный график).



$$R^2 = 0.91$$

### 3.1.2. Зависимость радиуса RMS от длин воздушных зазоров в объективе

#### Цель эксперимента

В данном разделе исследуется влияние неточностей в исполнении зазоров на радиус RMS.

#### Получение данных

Измерения проводятся аналогично пункту 1. Из серии измерений при разных длинах волн и углах лучей выбираем наибольший (то есть худший) радиус RMS. Таблица с данными представлена в приложении 1

#### Обработка данных

К полученным данным была применена модель линейной регрессии, где входные переменные - это толщины воздушных зазоров, а выходные данные - худший радиус RMS. Итоговое уравнение выглядит следующим образом

$$y = x_0 + x_1 * b_1 + x_2 * b_2 + x_3 * b_3$$

$$b_0 = -12.5$$

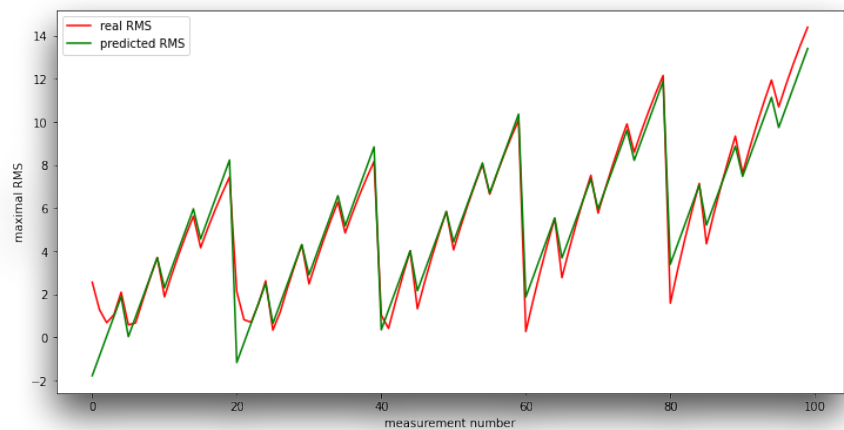
$$b_1 = 0.76$$

$$b_2 = 2.26$$

$$b_3 = 9.17$$

### Визуализация и анализ результатов

На графике ниже представлено сравнение аналитических результатов, которые дает модель линейной регрессии (зеленый график) и экспериментально полученных данных (красный график).



Оценка качества регрессии:

$$R^2 = 0.95$$

### **3.1.3. Зависимость длины рабочего отрезка от длин воздушных зазоров в объективе**

#### **Цель эксперимента**

В данном разделе исследуется влияние неточностей в исполнении зазоров на фокусное расстояние.

#### **Получение данных**

Для каждой комбинации толщин воздушных зазоров проводится фокусировка системы путем изменения величины рабочего отрезка.

#### **Обработка данных**

К полученным данным была применена модель линейной регрессии, где входные переменные - это толщины воздушных зазоров, а выходные данные - длина рабочего отрезка. Итоговое уравнение выглядит следующим образом

$$y = x_0 + x_1 * b_1 + x_2 * b_2 + x_3 * b_3$$

$$b_0 = 5.67$$

$$b_1 = - 0.03$$

$$b_2 = - 0.38$$

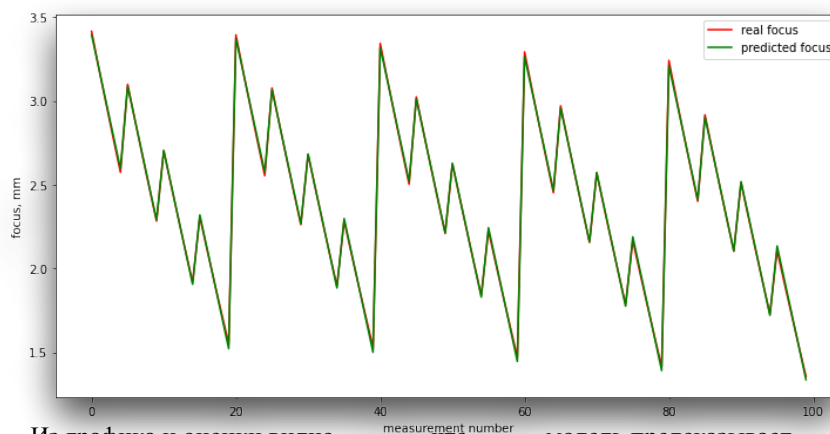
$$b_3 = - 2.00$$

#### **Визуализация и анализ результатов**

На графике ниже представлено сравнение аналитических результатов, которые дает модель линейной регрессии (зеленый график) и экспериментально полученных данных (красный график).

Оценка качества регрессии:

$$R^2 = 0.9993$$



Из графика и оценки видно, что модель предсказывает фокус с крайне высокой точностью.

### Вывод

Наибольшее влияние на оптические характеристики системы оказывает точность, с которой выдержан зазор между третьим и четвертым блоком.

### 3.4. Исследование влияния материала корпуса объектива на его характеристики

В предыдущих разделах исследовалась модель объектива в Zemax, а не сам объектив. Такой подход позволяет провести большее количество измерений за разумное время и выявить некоторые общие зависимости, но не учитывает особенностей реальных физических деталей и влияние корпуса объектива.

Поэтому следующим этапом стало изучение свойств реальных физических объективов в двух версиях - из титана и из алюминия.

#### 11 3.4.1. Исследование зависимости процента сбора энергии объективов в зависимости от точки поля для объективов с алюминиевым и титановым корпусами

Первой исследуемой характеристикой стал уровень сбора энергии точки в центральном пикселе и центральной зоне 3 на 3 пикселя при фокусировке параллельного пучка.

Исследовалась зависимость этого показателя от угла поля на длине волны 550 нм.

## 12. Оксана

11 апреля 2022 г., 16:35:12  
характеристики коллиматора и лазера

## 13. Оксана

11 апреля 2022 г., 17:01:55  
Как-то обосновать критерий

12

Экспериментальная установка состоит из источника питания, лазера, коллиматора, фотоприемника, подключенного к компьютеру и самого исследуемого объектива. Коллиматор с большим фокусным расстоянием преобразует лазерный луч в параллельный пучок, который, в свою очередь, фокусируется в точку на матрице фотоприемника.

Установка позволяет перемещать и наклонять фотоприемник, меняя таким образом точку поля и подстраивая систему по фокусу.

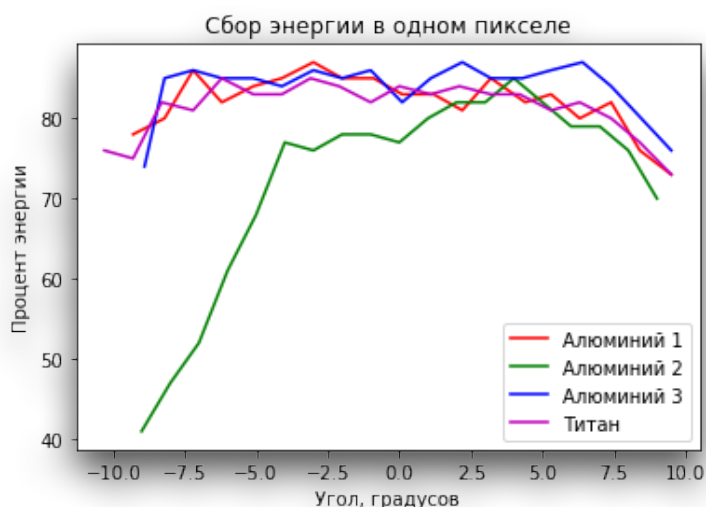
Результаты представлены на графиках, из которых видно, что однозначно установить, какой из материалов лучше, нельзя - титановый объектив оказался не самым худшим и не самым лучшим.

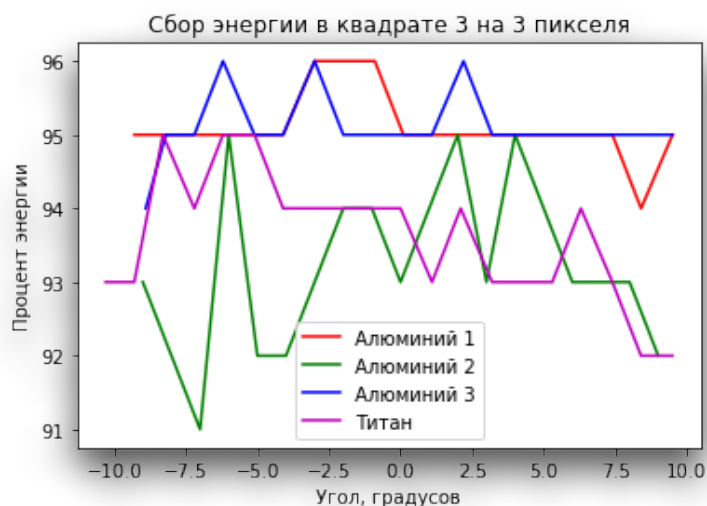
Угол поля менялся в пределах 10 градусов в каждую стороны. Изменения угла осуществлялись только в одном направлении, что обусловлено предположением осевой симметрии объектива.

В целом можно сказать, что не считая алюминиевого объектива номер 2, который существенно отличается от всех остальных, снижение уровня сбора энергии при изменении угла в указанном диапазоне является

13

приемлемым.





#### 14 3.4.2. Исследование температурной устойчивости объективов

Следующим этапом исследования объективов, входящих в состав прибора (в двух версиях корпуса - алюминиевом и титановом), на температурную устойчивость.

Диапазон температур был выбран в соответствии с типичными климатическими условиями в умеренном климатическом поясе: от -20 до +50 градусов Цельсия.

//Описать словами, как проводились измерения. Описать установку, что мы измеряем и тд. Вставить фотографии//

#### 5. Анализ влияния сдвигов, наклонов и децентровок элементов на оптические характеристики гиперспектрометра

//Обработать данные//

#### 6. Разработка и изготовление механических деталей стендового макета

#### 7. Юстировка, измерение оптических характеристик

#### 8. Выводы

Приложение 1. Таблицы экспериментальных данных зависимости процента сбора энергии от угла поля



### 1.Объектив 1а (алюминий)

Угол, градусов	Процент энергии в центральном пикселе	Процент энергии в квадрате 3 на 3 пикселя
-9,3	78	95
-8,2	80	95
-7,2	86	95
-6,2	82	95
-5,1	84	95
-4,1	85	95
-3,0	87	96
-2,0	85	96
-0,9	85	96
0,1	83	95
1,2	83	95
2,2	81	95
3,2	85	95
4,4	82	95
5,3	83	95
6,3	80	95
7,4	82	95
8,4	76	94
9,5	73	95

### 2.Объектив 2а (алюминий)

2а. Центральная горизонталь (крупно, шаг примерно 1 градус, диапазон +-9 градусов)

Угол, градусов	Процент энергии в центральном пикселе	Процент энергии в квадрате 3 на 3 пикселя
-9	41	93
-8	47	92

Угол, градусов	Процент энергии в центральном пикселе	Процент энергии в квадрате 3 на 3 пикселя
-7	52	91
-6	61	95
-5	68	92
-4	77	92
-3	76	93
-2	78	94
-1	78	94
0	77	93
1	80	94
2	82	95
3	82	93
4	85	95
5	82	94
6	79	93
7	79	93
8	76	93
9	70	92

26. Центральная горизонталь (мелко, шаг примерно 0.2 градуса, диапазон от -5 до -4 градусов)

Угол, градусов	Процент энергии в центральном пикселе	Процент энергии в квадрате 3 на 3 пикселя
-4	70	93
-4,2	72	93
-4,4	72	93
-4,6	73	93
-4,8	74	93
-5	74	93

2. Объектив 3а (алюминий)

Угол, градусов	Процент энергии в центральном пикселе	Процент энергии в квадрате 3 на 3 пикселя
-8,9	74	94
-8,2	85	95
-7,2	86	95
-6,2	85	96
-5,1	85	95
-4,1	84	95
-3,0	86	96
-2,0	85	95
-1,0	86	95
0,1	82	95
1,1	85	95
2,2	87	96
3,2	85	95
4,3	85	95
5,3	86	95
6,4	87	95
7,4	84	95
9,5	76	95

#### 4. Объектив 1т (титан)

Угол, градусов	Процент энергии в центральном пикселе	Процент энергии в квадрате 3 на 3 пикселя
-10,3	76	93
-9,3	75	93
-8,3	82	95
-7,2	81	94
-6,2	85	95
-5,1	83	95
-4,1	83	94
-3,1	85	94
-2,1	84	94

Угол, градусов	Процент энергии в центральной пикселе	Процент энергии в квадрате 3 на 3 пикселя
-1,0	82	94
0	84	94
1,1	83	93
2,1	84	94
3,2	83	93
4,2	83	93
5,3	81	93
6,3	82	94
7,4	80	93
8,4	77	92
9,5	73	92

**Приложение 2. Таблица экспериментальных и предсказанных данных зависимости ФПМ от толщины воздушных зазоров для одного объектива**

1 зазор, мм	2 зазор, мм	3 зазор, мм	Худший ФПМ (измеренный)	Худший ФПМ (предсказанный)
0.2	0.2	1.1	0.61	0.9
0.2	0.2	1.2	0.69	0.84
0.2	0.2	1.3	0.73	0.77
0.2	0.2	1.4	0.72	0.71
0.2	0.2	1.5	0.68	0.64
0.2	1	1.1	0.72	0.77
0.2	1	1.2	0.73	0.7
0.2	1	1.3	0.69	0.64
0.2	1	1.4	0.63	0.57
0.2	1	1.5	0.54	0.51
0.2	2	1.1	0.68	0.59

0.2	2	1.2	0.61	0.53
0.2	2	1.3	0.52	0.46
0.2	2	1.4	0.43	0.4
0.2	2	1.5	0.34	0.33
0.2	3	1.1	0.48	0.42
0.2	3	1.2	0.38	0.35
0.2	3	1.3	0.29	0.29
0.2	3	1.4	0.21	0.22
0.2	3	1.5	0.14	0.16
1	0.2	1.1	0.65	0.86
1	0.2	1.2	0.71	0.8
1	0.2	1.3	0.73	0.73
1	0.2	1.4	0.7	0.67
1	0.2	1.5	0.64	0.6
1	1	1.1	0.73	0.72
1	1	1.2	0.72	0.66
1	1	1.3	0.66	0.59
1	1	1.4	0.58	0.53
1	1	1.5	0.49	0.46
1	2	1.1	0.64	0.55
1	2	1.2	0.55	0.49
1	2	1.3	0.45	0.42
1	2	1.4	0.36	0.36
1	2	1.5	0.27	0.29
1	3	1.1	0.41	0.38
1	3	1.2	0.31	0.31
1	3	1.3	0.22	0.25

1	3	1.4	0.15	0.18
1	3	1.5	0.08	0.12
3	0.2	1.1	0.71	0.76
3	0.2	1.2	0.73	0.69
3	0.2	1.3	0.7	0.63
3	0.2	1.4	0.62	0.56
3	0.2	1.5	0.52	0.5
3	1	1.1	0.71	0.62
3	1	1.2	0.64	0.56
3	1	1.3	0.54	0.49
3	1	1.4	0.43	0.43
3	1	1.5	0.33	0.36
3	2	1.1	0.5	0.45
3	2	1.2	0.39	0.38
3	2	1.3	0.28	0.32
3	2	1.4	0.19	0.25
3	2	1.5	0.11	0.19
3	3	1.1	0.22	0.27
3	3	1.2	0.14	0.21
3	3	1.3	0.07	0.14
3	3	1.4	0.01	0.08
3	3	1.5	0.0	0.01
5	0.2	1.1	0.73	0.66
5	0.2	1.2	0.69	0.59
5	0.2	1.3	0.6	0.53
5	0.2	1.4	0.49	0.46
5	0.2	1.5	0.37	0.4

5	1	1.1	0.62	0.52
5	1	1.2	0.51	0.45
5	1	1.3	0.38	0.39
5	1	1.4	0.27	0.32
5	1	1.5	0.17	0.26
5	2	1.1	0.33	0.34
5	2	1.2	0.21	0.28
5	2	1.3	0.12	0.21
5	2	1.4	0.04	0.15
5	2	1.5	0.01	0.08
5	3	1.1	0.06	0.17
5	3	1.2	0.0	0.1
5	3	1.3	0.02	0.04
5	3	1.4	0.04	-0.03
5	3	1.5	0.0	-0.09
7	0.2	1.1	0.68	0.55
7	0.2	1.2	0.6	0.49
7	0.2	1.3	0.47	0.42
7	0.2	1.4	0.33	0.36
7	0.2	1.5	0.21	0.29
7	1	1.1	0.48	0.41
7	1	1.2	0.34	0.35
7	1	1.3	0.22	0.28
7	1	1.4	0.11	0.22
7	1	1.5	0.03	0.15
7	2	1.1	0.15	0.24
7	2	1.2	0.06	0.17

7	2	1.3	0.01	0.11
7	2	1.4	0.03	0.04
7	2	1.5	0.01	-0.02
7	3	1.1	0.02	0.07
7	3	1.2	0.02	0.0
7	3	1.3	0.02	-0.06
7	3	1.4	0.04	-0.13
7	3	1.5	0.05	-0.19

**Приложение 2. Таблица экспериментальных и предсказанных данных зависимости радиуса RMS от толщины воздушных зазоров**

1 зазор, мм	2 зазор, мм	3 зазор, мм	Худший RMS радиус(измеренный)	Худший RMS радиус(предсказанный)
0.2	0.2	1.1	2.56	-1.78
0.2	0.2	1.2	1.28	-0.86
0.2	0.2	1.3	0.68	0.05
0.2	0.2	1.4	1.05	0.97
0.2	0.2	1.5	2.1	1.89
0.2	1	1.1	0.58	0.03
0.2	1	1.2	0.67	0.95
0.2	1	1.3	1.72	1.87
0.2	1	1.4	2.75	2.78
0.2	1	1.5	3.71	3.7
0.2	2	1.1	1.88	2.3
0.2	2	1.2	2.91	3.22
0.2	2	1.3	3.88	4.13
0.2	2	1.4	4.78	5.05
0.2	2	1.5	5.63	5.97



0.2	3	1.1	4.16	4.57
0.2	3	1.2	5.07	5.48
0.2	3	1.3	5.92	6.4
0.2	3	1.4	6.71	7.32
0.2	3	1.5	7.45	8.23
1	0.2	1.1	2.12	-1.17
1	0.2	1.2	0.82	-0.25
1	0.2	1.3	0.7	0.66
1	0.2	1.4	1.55	1.58
1	0.2	1.5	2.63	2.5
1	1	1.1	0.34	0.64
1	1	1.2	1.16	1.56
1	1	1.3	2.28	2.48
1	1	1.4	3.32	3.39
1	1	1.5	4.3	4.31
1	2	1.1	2.48	2.91
1	2	1.2	3.53	3.83
1	2	1.3	4.51	4.74
1	2	1.4	5.43	5.66
1	2	1.5	6.29	6.58
1	3	1.1	4.85	5.18
1	3	1.2	5.76	6.09
1	3	1.3	6.62	7.01
1	3	1.4	7.42	7.93
1	3	1.5	8.17	8.84
3	0.2	1.1	1.03	0.35
3	0.2	1.2	0.42	1.27

3	0.2	1.3	1.68	2.19
3	0.2	1.4	2.89	3.1
3	0.2	1.5	4.02	4.02
3	1	1.1	1.33	2.17
3	1	1.2	2.57	3.08
3	1	1.3	3.73	4.0
3	1	1.4	4.83	4.92
3	1	1.5	5.85	5.83
3	2	1.1	4.06	4.43
3	2	1.2	5.15	5.35
3	2	1.3	6.18	6.27
3	2	1.4	7.13	7.18
3	2	1.5	8.03	8.1
3	3	1.1	6.65	6.7
3	3	1.2	7.6	7.62
3	3	1.3	8.48	8.53
3	3	1.4	9.31	9.45
3	3	1.5	10.09	10.37
5	0.2	1.1	0.27	1.87
5	0.2	1.2	1.7	2.79
5	0.2	1.3	3.06	3.71
5	0.2	1.4	4.33	4.63
5	0.2	1.5	5.52	5.54
5	1	1.1	2.78	3.69
5	1	1.2	4.08	4.6
5	1	1.3	5.31	5.52
5	1	1.4	6.45	6.44

5	1	1.5	7.53	7.36
5	2	1.1	5.77	5.95
5	2	1.2	6.91	6.87
5	2	1.3	7.98	7.79
5	2	1.4	8.98	8.71
5	2	1.5	9.91	9.62
5	3	1.1	8.59	8.22
5	3	1.2	9.58	9.14
5	3	1.3	10.5	10.05
5	3	1.4	11.36	10.97
5	3	1.5	12.16	11.89
7	0.2	1.1	1.59	3.4
7	0.2	1.2	3.11	4.31
7	0.2	1.3	4.55	5.23
7	0.2	1.4	5.89	6.15
7	0.2	1.5	7.15	7.06
7	1	1.1	4.34	5.21
7	1	1.2	5.72	6.13
7	1	1.3	7.01	7.04
7	1	1.4	8.21	7.96
7	1	1.5	9.34	8.88
7	2	1.1	7.62	7.48
7	2	1.2	8.81	8.39
7	2	1.3	9.93	9.31
7	2	1.4	10.97	10.23
7	2	1.5	11.95	11.14
7	3	1.1	10.7	9.74

7	3	1.2	11.73	10.66
7	3	1.3	12.68	11.58
7	3	1.4	13.57	12.49
7	3	1.5	14.4	13.41

**Приложение 3. Таблица экспериментальных и предсказанных данных зависимости фокуса от толщины воздушных зазоров**

<b>1 зазор, мм</b>	<b>2 зазор, мм</b>	<b>3 зазор, мм</b>	<b>Фокус(измерен ный)</b>	<b>Фокус(предсказан ный)</b>
0.2	0.2	1.1	3.42	3.4
0.2	0.2	1.2	3.2	3.2
0.2	0.2	1.3	2.99	3.0
0.2	0.2	1.4	2.78	2.8
0.2	0.2	1.5	2.57	2.6
0.2	1	1.1	3.1	3.09
0.2	1	1.2	2.89	2.89
0.2	1	1.3	2.68	2.69
0.2	1	1.4	2.48	2.49
0.2	1	1.5	2.28	2.29
0.2	2	1.1	2.7	2.7
0.2	2	1.2	2.5	2.5
0.2	2	1.3	2.3	2.3
0.2	2	1.4	2.11	2.1
0.2	2	1.5	1.92	1.91
0.2	3	1.1	2.31	2.32
0.2	3	1.2	2.11	2.12
0.2	3	1.3	1.92	1.92
0.2	3	1.4	1.73	1.72
0.2	3	1.5	1.55	1.52

1	0.2	1.1	3.39	3.37
1	0.2	1.2	3.18	3.17
1	0.2	1.3	2.97	2.97
1	0.2	1.4	2.76	2.77
1	0.2	1.5	2.55	2.57
1	1	1.1	3.08	3.07
1	1	1.2	2.87	2.87
1	1	1.3	2.66	2.67
1	1	1.4	2.46	2.47
1	1	1.5	2.26	2.27
1	2	1.1	2.68	2.68
1	2	1.2	2.48	2.48
1	2	1.3	2.28	2.28
1	2	1.4	2.09	2.08
1	2	1.5	1.9	1.88
1	3	1.1	2.28	2.3
1	3	1.2	2.09	2.1
1	3	1.3	1.9	1.9
1	3	1.4	1.71	1.7
1	3	1.5	1.53	1.5
3	0.2	1.1	3.34	3.32
3	0.2	1.2	3.13	3.12
3	0.2	1.3	2.91	2.92
3	0.2	1.4	2.71	2.72
3	0.2	1.5	2.5	2.52
3	1	1.1	3.02	3.01
3	1	1.2	2.81	2.81

3	1	1.3	2.61	2.61
3	1	1.4	2.41	2.41
3	1	1.5	2.21	2.21
3	2	1.1	2.62	2.63
3	2	1.2	2.42	2.43
3	2	1.3	2.22	2.23
3	2	1.4	2.03	2.03
3	2	1.5	1.84	1.83
3	3	1.1	2.23	2.24
3	3	1.2	2.03	2.04
3	3	1.3	1.84	1.84
3	3	1.4	1.65	1.64
3	3	1.5	1.47	1.44
5	0.2	1.1	3.29	3.26
5	0.2	1.2	3.08	3.06
5	0.2	1.3	2.86	2.87
5	0.2	1.4	2.66	2.67
5	0.2	1.5	2.45	2.47
5	1	1.1	2.97	2.96
5	1	1.2	2.76	2.76
5	1	1.3	2.56	2.56
5	1	1.4	2.35	2.36
5	1	1.5	2.16	2.16
5	2	1.1	2.57	2.57
5	2	1.2	2.37	2.37
5	2	1.3	2.17	2.17
5	2	1.4	1.98	1.97

5	2	1.5	1.79	1.77
5	3	1.1	2.17	2.19
5	3	1.2	1.97	1.99
5	3	1.3	1.78	1.79
5	3	1.4	1.6	1.59
5	3	1.5	1.41	1.39
7	0.2	1.1	3.24	3.21
7	0.2	1.2	3.03	3.01
7	0.2	1.3	2.81	2.81
7	0.2	1.4	2.6	2.61
7	0.2	1.5	2.4	2.41
7	1	1.1	2.92	2.9
7	1	1.2	2.71	2.7
7	1	1.3	2.5	2.5
7	1	1.4	2.3	2.3
7	1	1.5	2.1	2.1
7	2	1.1	2.51	2.52
7	2	1.2	2.31	2.32
7	2	1.3	2.11	2.12
7	2	1.4	1.92	1.92
7	2	1.5	1.73	1.72
7	3	1.1	2.11	2.13
7	3	1.2	1.91	1.93
7	3	1.3	1.72	1.73
7	3	1.4	1.54	1.54
7	3	1.5	1.36	1.34