

Результаты испытаний макетного гиперспектрометра ОЭА-ГС

В.Е. Квитка, М.В. Ключников, А.Н. Князев, В.Л. Алаторцев, Д.М. Гуцин

Филиал АО РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Гуськова, 8, стр. 2

Тел.: +7 (499) 734-94-93, e-mail: optecs@mail.ru

Для отработки новых технологий многоспектральной (гиперспектральной) съемки, а так же методов аттестации и обработки полученной информации в НПП «ОПТЭКС» выполнена работа по макетированию гиперспектрометра (ОЭА-ГС), который разрабатывался по Техническому заданию (ТЗ) АО РКЦ «Прогресс».

В соответствии с ТЗ, целенаправленно была выбрана функциональная схема построения гиперспектрометра с «клиновыми» светофильтрами (КСФ) – интерференционными светофильтрами с непрерывным пропусканием спектральных полос в определенном диапазоне спектра. Такие светофильтры позволяют получить на матричном фотоприемнике разбитое на спектральные полосы изображение объекта съемки без дополнительных диспергирующих элементов (спектральных призм и решеток). Полосы пропускания в КСФ линейно зависят от координаты вдоль одной из сторон светофильтра. Кадры снимаются в режиме сканирования вдоль чередования полос и считываются последовательно, в результате за определенный промежуток времени формируется набор спектральных снимков, необходимых для получения стандартного куба данных X, Y, λ . Принцип работы КСФ приведен на рисунке 1.



Рисунок 1

Основные преимущества предлагаемой схемы построения ГС – это создание большого количества спектральных каналов с шириной пропускания 5...7нм в диапазоне длин волн 400...900нм. ГС с клиновыми светофильтрами могут быть разработаны без подвижных узлов, они проще в сборке и юстировке [1], [2].

Описание конструкции макетного гиперспектрометра ОЭА-ГС

Макетный образец ОЭА-ГС построен на основе высокоскоростной камеры «Fastvideo-500M» с КМОП-матрицей Lupa-1300-2 форматом 1280x1024 пикселя и размером пикселя 14x14мкм. На рисунке 2 показана конструкция гиперспектрального блока макета ОЭА-ГС, где КСФ расположен в фокальной плоскости изображающего объектива и совмещен с промежуточным изображением. Объектив камеры переносит промежуточное изображение в масштабе 1:1 на КМОП-матрицу. Для макетного образца ОЭА-ГС на фирме «ИЗОВАК» (Беларусь) были разработаны и изготовлены три клиновых светофильтра, так как оказалось проблематичным изготовить один светофильтр под определенный размер КМОП-матрицы с заданной шириной спектральных полос 7...10нм для спектрального диапазона 410...900нм. Полоса пропускания меняется вдоль длинной стороны КСФ. Габаритные размеры КСФ составляют 22x19x1.3мм со световой зоной 17x14мм. Перестановка светофильтров в макете осуществляется с помощью ручного механизма переключения.

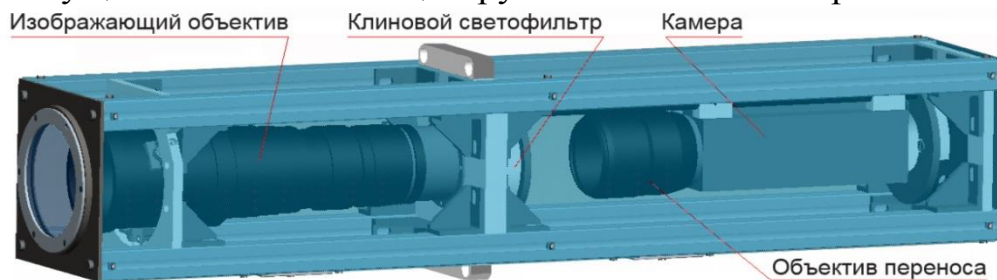


Рисунок 2

Результаты исследования ОЭА-ГС

Для определения технических характеристик ОЭА-ГС, отработки ПО и выявления замечаний к элементам конструкции, были проведены следующие исследовательские работы:

- проверка углового разрешения и углового поля зрения;
- определение повторяемости выставления положений КСФ;
- определение спектрального разрешения в спектральном диапазоне работы;
- определение чувствительности на определенной длине волны;
- определение неравномерности чувствительности по полю кадра;
- получение последовательности кадров и отработка программного обеспечения для получения гиперспектральных кадров.

Проверка углового разрешения и углового поля зрения проведена стандартным способом на оптической скамье типа ОСК-2. Для исследования использовалась мишень из состава коллиматора скамьи и углоповоротный стол. Угловое поле зрения макета - 1,95°x2,44°.

Исследование повторяемости выставления и определение спектрального разрешения КСФ проводились на монохроматоре. Были получены калибровочные кривые - зависимости центра полосы пропускания от номера столбца кадра, показанные на рисунке 3.

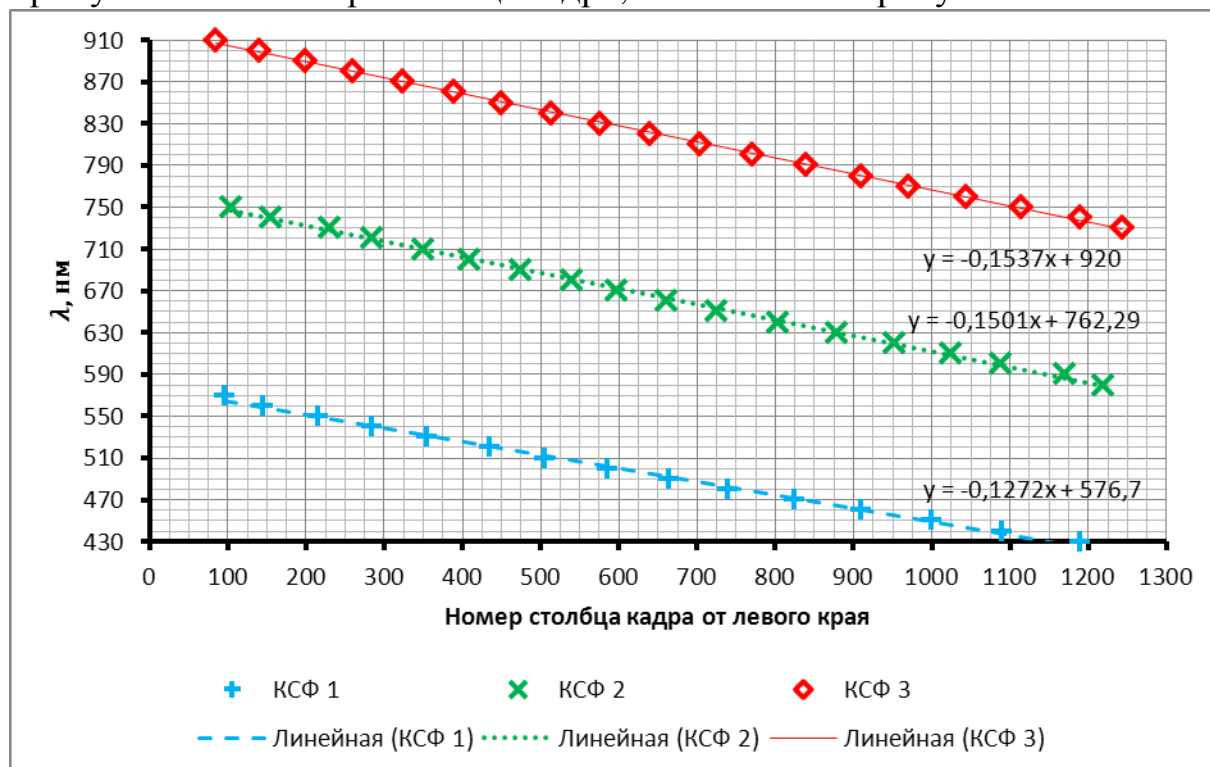


Рисунок 3

При переключении светофильтров возникает небольшой разброс в их установке, обусловленный люфтом в механизме держателя КСФ. Это смещение приводит к погрешности определения центра полосы пропускания. В таблице 1 приведены результаты обработки серии снимков с фиксацией положений одной спектральной полосы в кадре.

Таблица 1. Основные характеристики гиперспектрометра ОЭА-ГС

Тип клиновидного светофильтра (КСФ)	КСФ 1	КСФ 2	КСФ 3
Полоса пропускания, [нм]	430-563	583-750	736-908
Количество спектральных зон	16	22	22
Ширина полосы пропускания в зоне, [нм]	9	8	8,2
Ширина спектральной зоны, [пикселей]	71	53	53
Градиент полосы пропускания КСФ, [нм/пиксель]	0,13	0,15	0,16
Погрешность установки полосы пропускания светофильтров, [нм]	$\pm 0,25$	$\pm 0,18$	$\pm 1,21$
Предельное угловое разрешение ОЭА-ГС	7,7''	7,25''	8,15''

Исследования чувствительности и её неравномерности по полю кадра проводились с использованием световой интегрирующей сферы. На входное окно ОЭА-ГС устанавливался светофильтр с полосой пропускания $700\pm 5\text{нм}$. По серии снятых с разной экспозицией кадров была определена чувствительность $230 \text{ АЦП}/(\text{Вт}/\text{м}^2)$ на длине волны 700нм . Неравномерность чувствительности по полю кадра изучалась по снимкам равномерного поля световой сферы с разными КСФ.

В макетном приборе имеются неравномерности спектральной чувствительности, обусловленные дефектами светофильтров, колебаниями спектральных зависимостей квантовой эффективности ФПЗС и коэффициента пропускания светофильтра. Была опробована методика «Устранения неравномерности спектральной чувствительности», где считаем, что для идеальной гиперспектральной системы кадр равномерной засветки входного окна, нормированный на спектральную яркость лампы интегральной сферы (далее - ЛКРЗ), будет иметь вид серого прямоугольника. Вид ЛКРЗ для КСФ1 и его горизонтальный профиль приведены на рисунках 4 и 5 соответственно.

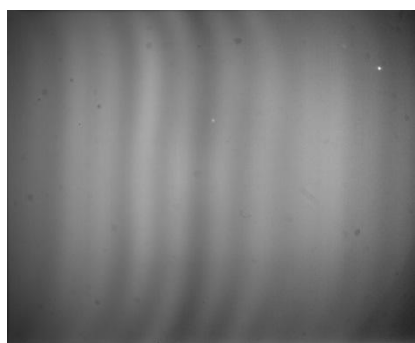


Рисунок 4



Рисунок 5

Устранение этой неравномерности возможно после почленного домножения ЛКРЗ на калибровочную матрицу B размером 1280×1024 , которая описывается формулой (1):

$$B_{ij} = \frac{\max(A)}{A_{ij}} \quad (1)$$

Где $\max(A)$ – элемент матрицы A , описывает самый яркий пиксель ЛКРЗ.

Полученную по формуле (1) калибровочную матрицу B применили для выравнивания первичных снимков. На рисунке 6 показан исходный снимок белой стены и синего автомобиля, а на рисунке 7 - снимок, выровненный почленным домножением на калибровочную матрицу B . Верхние края кадров соответствуют длине волны 430 нм , нижние – 563 нм .



Рисунок 6



Рисунок 7

Получение последовательности кадров проводилось с помощью сканирующей платформы. Были проведены пробные съёмки объектов с ярко выраженными спектральными характеристиками. Для обработки снимков и получения гиперкуба была написана Программа обработки (ПО) на языке C++. Снятые при сканировании видеосюжеты, сохранённые в формате .fvlab, загружались в приложение, где производился выбор кадров для создания гиперкуба. Далее создавался многослойный снимок в формате .tiff, каждый слой которого соответствует узкой спектральной полосе. Каждый слой гиперкуба можно сохранять как отдельное изображение в градациях серого или в цвете, соответствующем длине волны. На рисунке 8 показаны примеры слоёв гиперкуба, где красный автомобиль (в центре каждого кадра) изображен для длин волн 605 нм и 690 нм. Каждый слой гиперкуба шит с помощью ПО из нескольких горизонтальных полос, взятых из разных первичных снимков и соответствующих одной спектральной зоне светофильтра.



Рисунок 8. Слои гиперспектрального изображения красного автомобиля для длин волн 605 нм (слева) и 690 нм (справа).

При обработке изображений, полученных с помощью ОЭА-ГС, для каждого пикселя изображения определяется спектр отражённого от объекта съёмки солнечного излучения. Далее можно установить спектральную зависимость альбедо объекта съёмки и провести его классификацию [3]. Анализируя многослойные изображения, были

построены спектральные профили синего и красного автомобилей, (рисунок 9), а также проведено восстановление их цветных изображений путем сложения окрашенных слоев гиперкуба, соответствующих длинам волн RGB фильтров.



Рисунок 9

Литература

1. В.Е. Квитка, М.В. Ключников, А.Н. Князев, Г.В. Бунтов. Расчёт параметров гиперспектрометра на основе клинового светофильтра. Труды 57-й научной конференции МФТИ с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения П. Л. Капицы. Аэрофизика и космические исследования. – 2014.
2. Губанова Л.А. Градиентные интерференционные системы. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. СПб, ЛИТМО, 2008.
3. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.