

Моделирование изображающего гиперспектрометра на основе спектрального фильтра

А.Н. Кузнецова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

Аннотация

Описано моделирование работы гиперспектрометра на основе дифракционной решётки со ступенчатой линейно возрастающей высотой рельефа. Описаны методы построения гиперспектрального куба из цветного снимка. Показаны результаты работы гиперспектрометра на примере фотоснимков. Вычислено качество восстановления исходного цветного изображения из гиперспектрального.

Ключевые слова: гиперспектрометр; гиперспектральный куб; спектр; широкополосный спектральный фильтр

1. Введение

В настоящее время широкое применение получили методы оптической спектрографии, в которой наряду с анализом пространственной информации о различных объектах изучается также их спектральное распределение. В качестве примера можно привести методы дистанционного зондирования Земли, астрономию, материаловедение, металлургию, а так же в перспективных научных и оборонных разработках [1].

Среди отличительных особенностей спектрографии можно выделить противоречивость двух основных задач: увеличение разрешения пространственной информации, являющаяся классической задачей изображающей оптики, и необходимость одновременного пространственного увеличения спектрального разрешения, в результате чего ухудшаются характеристики качества изображения [2].

В спектрографии обычно выделяется два вида спектральных приборов [3] – мультиспектральные и гиперспектральные. Мультиспектральные приборы выделяют из диапазона от видимого до инфракрасного излучения узкую полосу, на которой формируют несколько изображений. Гиперспектральные приборы работают на всём диапазоне частот, причём отдельные каналы непосредственно прилегают по частоте друг к другу, не имея разрывов. В результате такого анализа на всём диапазоне частот видимого и ближнего инфракрасного излучения получается гиперспектральный куб, отдельные слои которого содержат информацию о спектральных характеристиках двумерной поверхности на достаточно малом диапазоне длин волн.

Проекты, в которых используются гиперспектральные снимки часто реализуются [4,5] для решения следующих задач: обнаружение объекта на фоне других; анализ и распознавание материалов, минералов, почвенных пород; различение близких по спектру материалов.

Объектом исследования данной работы является гиперспектрометр на основе широкополосного спектрального фильтра.

Предметом исследования является метод моделирования гиперспектрометра на основе дифракционной решётки со ступенчатым линейно возрастающим по высоте рельефом.

Цель данной работы состоит в моделировании работы гиперспектрометра на основе широкополосного спектрального фильтра и анализ качества восстановления цветного изображения.

В соответствии с поставленной целью, были сформулированы следующие задачи:

- разработка метода формирования гиперспектрального куба на основе цветного фотоснимка;
- моделирование работы спектрального фильтра;
- разработка модели изображающего гиперспектрометра на основе спектрального фильтра;
- анализ характеристик качества восстановления исходного цветного снимка.

Научно-практическая новизна и значимость полученных результатов:

- разработан метод формирования гиперспектрального куба на основе цветного фотоснимка;
- проведено моделирование работы гиперспектрального широкополосного фильтра;
- проведено моделирование работы гиперспектрометра с ДОО в виде ступенчатого линейно увеличивающегося по высоте рельефа;
 - проведён анализ характеристик качества восстановления исходного цветного снимка.

2. Математическая модель

В качестве диспергирующего элемента в спектрометре может использоваться как призма, так и дифракционная решетка. Преимуществом дифракционной решётки, по сравнению с призмой, является компактность.

В данной работе исследуется схема спектрометра с дифракционным элементом со штрихами переменной высоты, высота линейно меняется от одного края решетки к другому. В этом случае значение сигнала на матрице по растру изображения $A(x, y)$ будет определяться формулой

$$A(x, y) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda, x) \eta(\lambda) S(\lambda, x, y) d\lambda,$$

где $\tau(\lambda, x)$ - коэффициент пропускания дифракционной решетки, $\eta(\lambda)$ – спектральная чувствительность ПЗС матрицы, λ_1, λ_2 - границы спектрального диапазона работы спектрометра, $S(\lambda, x, y)$ – гиперспектральное изображение.

Высота штрихов решетки должна изменяться от значения

$$h_1 = \frac{\lambda_1}{2(n-1)}$$

до значения

$$h_2 = \frac{\lambda_2}{2(n-1)},$$

где n – показатель преломления решетки для данной длины волны.

В зависимости от периода такой дифракционной решетки возможно два варианта компоновки гиперспектрометра. На рисунке 1 представлена двухступенчатая оптическая схема, в которой объектив 1 формирует изображение на дифракционном фильтре 2, а затем объектив 3 формирует изображение от светового поля, прошедшего через спектральный фильтр.

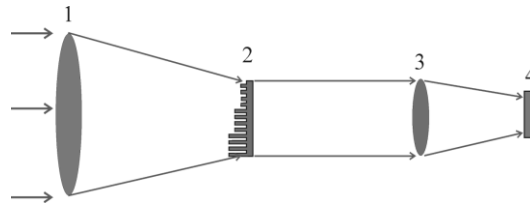


Рис. 1. Оптическая схема системы.

Оптическая схема гиперспектрометра с двумя объективами и спектральным фильтром в виде дифракционной решетки с переменной высотой штрихов представлена на рис. 1, где 1 – объектив,

2 – спектральный фильтр (дифракционная решетка с переменной высотой штрихов),

3 – второй объектив,

4 – ПЗС матрица.

При этом на период дифракционной решетки d накладывается очевидное ограничение.

$$d < \frac{\lambda}{\sin(\arctg \frac{D_1 + D_2}{2l})},$$

где λ – коротковолновая граница рабочего спектрального диапазона, D_1, D_2 - диаметры спектрального фильтра и второго объектива соответственно, l – расстояние между спектральным фильтром и вторым объективом.

3. Результаты моделирования

При моделировании гиперспектральных изображений был разработан алгоритм вычисления значения интенсивности для длины волны $\lambda \in (B, R)$, где B - длина волны голубого цвета, R - длина волны красного цвета.

Для каждого пикселя исходного цветного изображения можно вычислить значения интенсивностей A_p при данной длине волны λ_p , интерполируя полиномом, проходящим через значения интенсивностей A_R, A_G, A_B соответствующих длинам волн красного, зелёного и синего цвета. Варьируя длину волны λ можно получить трёхмерный массив данных интенсивностей, где первые две координаты x, y – пространственные, λ - длина волны.

Для моделирования N компонентов гиперспектрального изображения из цветного изображения, был разработан следующий алгоритм.

1. Представление исходного цветного изображения как двумерного массива данных, где индексы i, j массива – пространственные координаты, а значение - целочисленное значение интенсивности, в котором первые 3 байта хранят интенсивности R, G, B – компонент.

2. Строится интерполяция полиномом через узлы сетки, представляющих собой значения интенсивностей A_R, A_G, A_B для красного, зелёного и синего цветов, и находится значение интенсивности A_p для данной длины волны $\lambda_p \in (B, R)$, рис. 2.

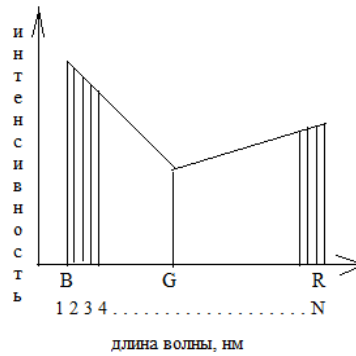


Рис. 2. Линейная интерполяция интенсивностей для длин волн λ_p .

3. Полученное значение интенсивности, умноженное на $\eta(\lambda_p)$ записываем в первые три байта целочисленного типа, получившееся значение записываем в отдельный массив по тем же пространственным координатам i, j .
4. Для каждого элемента исходного массива (пикселей) повторяются шаги 2,3. В итоге получается массив интенсивностей отдельного изображения, представляющего собой изображение с градациями серого цвета. Собирается изображение из этого массива и записывается на диск.
5. Шаги 2,3,4 повторяются для следующей длины волны

$$\lambda_{p+1} = \lambda_p + \Delta\lambda.$$

В итоге получается N компонентов гиперспектрального изображения, представляющих собой полутонные изображения для узкого диапазона длин волн.

Для восстановления цветного изображения на основе гиперспектральных изображений необходимо решить СЛАУ вида:

$$A_k(l) = \sum_p \tau_k(\lambda_p) \eta(\lambda_p) S_k(\lambda_p, l),$$

$$p = \overline{1, N}; k = \overline{1, M}, k < p.$$

В этой формуле $\tau_k(\lambda_p)$ – функции пропускания определённой длины волны, определяется по формуле

$$\tau(\lambda) = \cos^2\left(\frac{0.5h\pi}{\lambda}\right),$$

где h - соответствующая высота рельефа дифракционной решетки.

4. Анализ результатов

Для оценки точности восстановления изображения, можно применить формулу вычисления СКО для каждой из трёх компонент RGB:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{I \times J} \sum_{i,j} (A_{ij} - \bar{A}_{ij})^2}.$$

Усреднив значение СКО для трёх компонент, получим общее значение среднего квадратичного отклонения $\sigma_{\text{общ}} = \frac{\sigma_r + \sigma_g + \sigma_b}{3}$.

На вход моделируемой системы изображение подавалось изображение на рис. 3, компоненты гиперспектрального куба для разных длин волн представлены на рис. 4-6.

Среднее значение интенсивности для красной составляющей: $S_r = 164$. Абсолютное СКО для красной составляющей: $\delta_g = 30$. Относительное СКО для красной составляющей: $\sigma_b = 18\%$.

Среднее значение интенсивности для зелёной составляющей: $S_r = 160$. Абсолютное СКО для зелёной составляющей: $\delta_g = 26$. Относительное СКО для зелёной составляющей: $\sigma_b = 16\%$.

Среднее значение интенсивности для голубой составляющей: $S_r = 170$. Абсолютное СКО для голубой составляющей: $\delta_g = 29$. Относительное СКО для голубой составляющей: $\sigma_b = 17\%$. Средняя погрешность изображения: $\Omega = 17\%$.



Рис. 3. Исходное цветное изображение.



Рис. 4. Компоненты гиперспектрального куба для длины волны $\lambda_1 = 480$ мкм.



Рис. 5. Компоненты гиперспектрального куба для длины волны $\lambda_2 = 530$ мкм.



Рис. 6. Компоненты гиперспектрального куба для длины волны $\lambda_3 = 700$ мкм.

5. Заключение

В процессе выполнения данной работы были получены следующие основные результаты:

- Разработан метод моделирования спектрального гиперкуба из цветного изображения;
- Проведено моделирование работы широкополосного спектрального фильтра, представляющего собой дифракционную решётку со ступенчатым линейно возрастающим профилем.
- Разработано программное обеспечение для моделирования работы гиперспектрометра на основе спектрального фильтра, проанализированы результаты моделирования.

Высокая погрешность восстановления изображения вызвана плохой обусловленностью $cond(T) = \|T\| \|T^{-1}\|$ матрицы T функции пропускания.

Так, при количестве дискретных длин волн равном 44 и 44 функций пропускания, число обусловленности матрицы, составленной из коэффициентов, вычисленных по формуле $\tau(\lambda) = \cos^2(\frac{0.5h\pi}{\lambda})$ равна: $cond(T) = 1,7 \cdot 10^{17}$.

Такое число обусловленности свидетельствует о том, что даже небольшие возмущения, накопленные в результате арифметических операций и округления в исходных данных, могут вызвать сильные отклонения решения при восстановлении изображения. Для устранения данных недостатков возможно использование специализированных вычислительных методов решения плохо обусловленных СЛАУ, более точная аппроксимация сплайнами интенсивностей компонентов гиперспектрального изображения и использование большей разрядной сетки при проведении вычислений.

Литература

- [1] Скиданов, Р.В., Бланк, В.А., Морозов, А.А. Исследование изображающего спектрометра на основе дифракционной линзы // Компьютерная оптика. 2015. Том 39. №2. С. 210-221.
- [2] Воропай, Е.С. Дисперсионный гиперспектрометр с реконфигурируемой входной апертурой на основе микрзеркальной матрицы / Е.С. Воропай, И.М. Гулис, А.Г. Купреев [и др.] // Вестник БГУ, 2009. Сер. 1, № 3. С. 31-35.
- [3] Хонина, С.Н. Бинарная линза: исследование локальных фокусов / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 3. С. 339-346.
- [4] Казанский, Н.Л. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. 2011. Т. 38, № 3. С. 325-345.
- [5] Kitaura, N. Spectrometer employing a micro-Fresnel lens /N. Kitaura, S. Ogata, Y. Mori // Optical Engineering. 1995. Vol. 34. P.584-588.