

# Высокоскоростной изображающий гиперспектрометр на основе скрещенных дифракционных решёток

Д.А. Кузнецов

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

## Аннотация

Описано моделирование работы гиперспектрометра на основе двух скрещенных под углом  $90^\circ$  дифракционных решёток. Представлены результаты работы на примере аэрофотоснимков. Проанализировано качество восстановления спектра яркого точечного объекта на фоне городского ландшафта.

*Ключевые слова:* гиперспектрометр; БПФ; дифракционная решётка; спектр; аэрофотоснимки

## 1. Введение

В настоящее время особое распространение получили задачи дистанционного зондирования объектов различного рода, без непосредственного контакта с ними. К таким объектам можно отнести поверхность земли, космические объекты, выхлоп и тепловое излучение летательных аппаратов. Для получения и анализа спектра исследуемого объекта необходимо применение диспергирующих оптических элементов, среди которых особое значение имеют призма и дифракционная решётка. К преимуществам призмы можно отнести доступность потребителю и более низкую стоимость. К преимуществам дифракционной решётки относят малую зависимость угловой дисперсии от длины волны, что удобно для измерения длин волн отдельных спектральных линий [1]. При использовании дифракционной решётки можно использовать пропускающую и отражающую решётку. Отражающая решётка, или как её называют, решётка с блеском имеет более высокую дифракционную эффективность, однако существенно усложняет оптическую систему из-за необходимости установки под углом к оптической оси. При этом часто рельеф наносится на неплоскую поверхность, один из примеров – схема Оффнера [2].

При использовании гиперспектральной аппаратуры на летательных и космических аппаратах высокие требования предъявляются к конструктивной прочности устройства, малом размере и надёжной работе в большом диапазоне температур. Так, при взлёте летательного аппарата температура устройства может достигать  $40^\circ\text{C}$ , а при полёте на больших высотах и безвоздушном пространстве опускаться до  $-5^\circ\text{C}$  [3]. Такие ограничения приводят к разумному требованию конструкторской простоты оптической системы и отказоустойчивости, а также к устойчивости к температурным деформациям [4]. По этой причине была выбрана классическая оптическая система с последовательно расположенными на оптической оси положительной линзой, двумя скрещенными дифракционными решётками, положительной линзой и ПЗС матрицей. Использование двух дифракционных решёток позволяет уменьшить влияние фоновых помех за счёт пространственного разделения спектра по двум пересекающимся направлениям.

Объектом исследования является восстановленный спектр исходного двумерного сигнала.

Предметом исследования в данной работе является вычисление характеристик качества восстановления спектра яркого точечного объекта на фоне аэрофотоснимка при разных относительных уровнях яркости.

Цель данной работы состоит в моделировании работы гиперспектрометра на основе скрещенных дифракционных решёток и анализ качества восстановления спектра исследуемого объекта.

В соответствии с поставленной целью, были сформулированы следующие задачи:

- разработка модели изображающего гиперспектрометра и программная реализация принципов работы дифракционной решётки;
- разработка программного обеспечения для снятия спектра исследуемого объекта после регистрации на ПЗС;
- анализ характеристик качества восстановления спектра в зависимости от разных типов фонового изображения и его интенсивности.

### Научно-практическая новизна и значимость полученных результатов:

- разработана модель изображающего гиперспектрометра на основе скрещенных дифракционных решёток и её программная реализация;
- реализовано программное обеспечение для вычисления спектра объекта по его изображению;
- приведены оценки качества восстановления спектра и показана применимость построенной модели для задач анализа спектра точечного объекта.

## 2. Математическая модель

Оптическая система гиперспектрометра представлена на рисунке 1. Источник излучения, расположенный в переднем фокусе собирающей линзы 2; 3 – скрещенные дифракционные решётки, находящиеся на фокусном расстоянии от линз 2 и 4, 5 – экран, расположенный в заднем фокусе линзы 3.

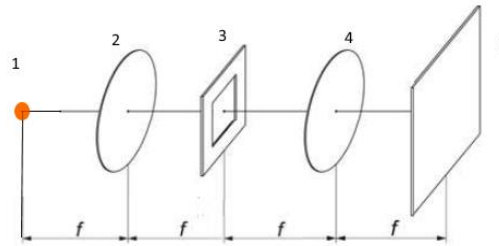


Рис. 1. Схема оптической системы.

Излучение от точечного объекта 1, проходя через первую линзу, попадает на апертуру дифракционной решётки, где разделяется в отдельные порядки дифракции. Распространяясь дальше, они собираются линзой 3 на экране 4. В качестве экрана может использоваться ПЗС-матрица для перевода распределения интенсивности в цифровой вид.

Математически принцип действия линзы можно описать преобразованием Фурье, результатом которого является амплитудно-фазовое распределение в фокусе линзы, где расположены дифракционные решётки.

$$A(u, v) = \iint_{\Omega} U(x, y) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy,$$

где  $U(x, y)$  – амплитудно-фазовое распределение до линзы,

$A(u, v)$  – распределение после линзы,

$\Omega$  – область апертуры.

Чисто фазовый дифракционный элемент, в данном случае пропускающие дифракционные решётки, прилегающие вплотную друг к другу, осуществляет фазовое преобразование волнового фронта. Такое преобразование можно описать в следующем виде:

$$U(u, v) = A_0(u, v) e^{\varphi(u, v) + \phi(u, v)},$$

где  $A_0(u, v)$  – амплитуда поля до дифракционного элемента,

$\varphi(u, v)$  – фаза поля до дифракционного элемента,

$\phi(u, v)$  – фаза дифракционного элемента.

Скрещенные дифракционные решётки расположены на одной оптической оси под углом  $90^\circ$ . Профиль каждой из решёток изображён на рис.2.

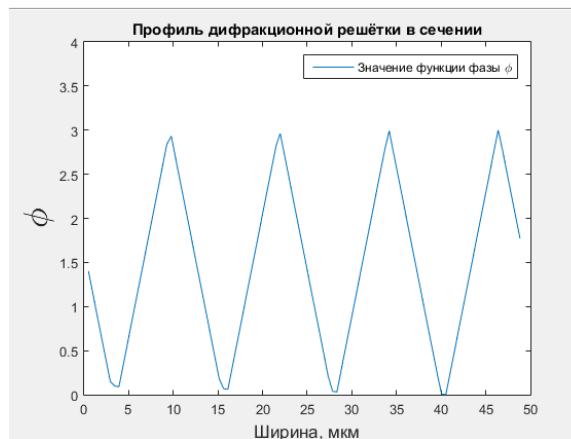


Рис. 2. Фазовая функция дифракционной решётки.

При совместном действии двух дифракционных решёток их фазы складываются, что можно описать как действие одной фазовой решётки со сложным профилем, как изображено на рис. 3.

## 3. Результаты моделирования

Принцип двух скрещенных дифракционных решёток можно описать следующим образом: после прохождения первой дифракционной решётки излучение точечного источника разделяется на отдельные порядки дифракции, которые на следующей решётке также отклоняются на угол, равный углу скрещивания решёток. Заметим, что в данной

работе использовался метод изменения периода дифракционных решёток вместо изменения длины волны излучения, что позволило использовать БПФ и достигнуть высокой скорости моделирования гиперспектрального изображения. Математически приём корректен, так как расстояние до максимумов практически линейно зависит от периода дифракционной решётки, также как и от длины волны. Использование данного метода позволяет расширить область применимости алгоритма на инфракрасный диапазон [5, 6].

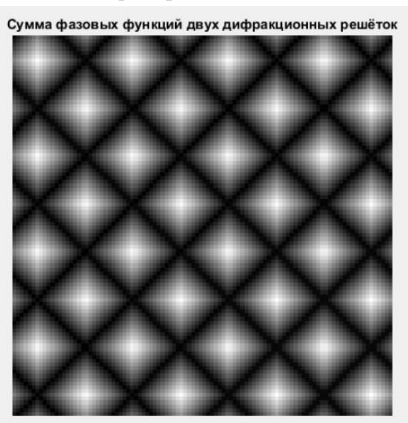


Рис. 3. Сумма фазовых функций двух перекрёстных решёток.



Рис. 4. Распределение на экране после прохождения через оптическую систему.

Линза 3 также осуществляет преобразование Фурье, в результате чего на экране формируется (рис. 4) амплитудно-фазовое распределение. В случае если вместо экрана выступает ПЗС-матрица, регистрируется интенсивность по формуле:

$$I = |U(u, v)|^2$$

В качестве фонового изображения использовались аэрофотоснимки города Самара и ближайших окрестностей, взятые из открытых источников. При этом фоновое изображение в формате RGB переводилось в панхроматическое усреднением компонент. Размер снимка равен  $2048 \times 2048$  пикселей. Пример такого изображения и точечного источника поверх него представлен на рис. 5.

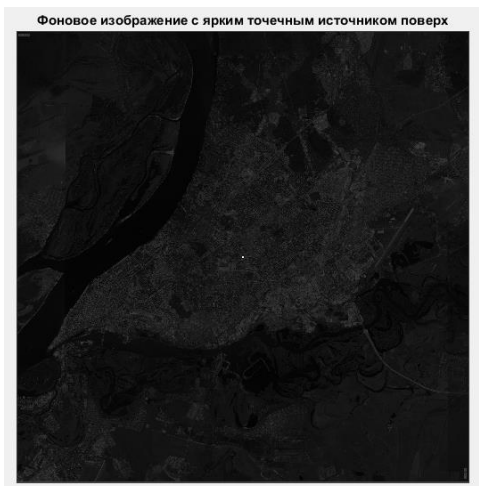


Рис. 5. Яркий источник на фоне г. Самара.

После прохождения моделируемой оптической системы гиперспектрометра получается изображение следующего вида, рис. 6.

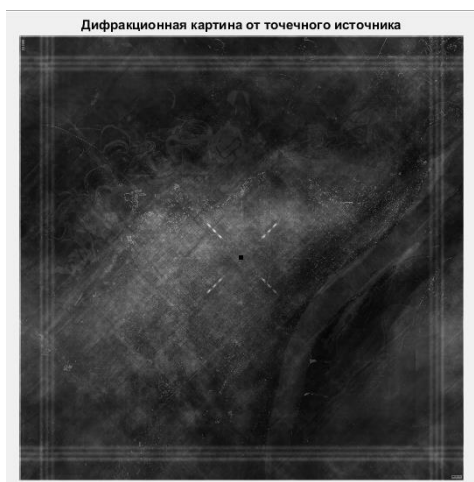


Рис. 6. Распределение интенсивности на экране от точечного источника на фоне города.

Изображение составлено суммированием 40 дифракционных картин полученных при линейно увеличивающемся периоде дифракционной решётки. Центральный максимум нулевого порядка был вырезан из изображения для наглядности результатов. С помощью снятия интенсивности пикселей по координатам центрального креста восстанавливается спектр исследуемого объекта. Дублирование спектра по пересекающимся направлениям позволяет в некоторой степени нивелировать влияние случайных шумов фонового изображения.

#### 4. Оценка качества восстановления спектра

Для задания спектра исследуемого объекта при моделировании спектрального изображения интенсивность пикселей зададим функцией от периода дифракционной решётки

$$S = \left| \sin\left(\frac{T}{C_0}\right) \right|, \text{ где}$$

$T$  – период дифракционной решётки,

$C_0$  – константа для масштабирования функции вдоль оси абсцисс. Уровень интенсивность фона относительно интенсивности источника регулируется параметром  $\alpha = [0, 1]$ . Результаты восстановления спектра при разном уровне интенсивности фонового изображения представлены на рис. 7.

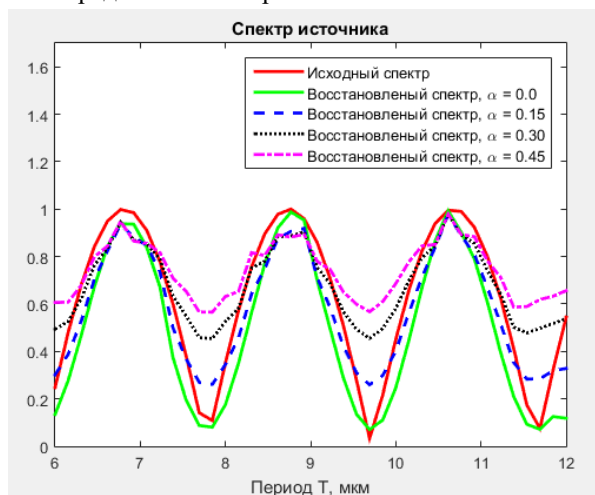


Рис. 7. Восстановленный спектр источника при разных значениях уровня фона.

Хорошо видно ухудшение восстановления кривой исходного спектра при увеличении интенсивности фона из-за чего происходит «сглаживание» снятого сигнала. Приведём также график СКО полученного спектра при разных значениях  $\alpha$  на рис. 8.



Рис. 8. СКО при разных значениях уровня фона.

Значение среднеквадратичного отклонения на промежутке  $\alpha = [0, 0.15]$  уменьшается, что связано с «подтягиванием» провалов вверх, что улучшает данную характеристику. С дальнейшим увеличением уровня фона СКО монотонно увеличивается. Другой характеристикой качества восстановления сигнала можно считать модуль абсолютного отклонения восстановленного спектра от исходного, его значение продемонстрировано на рис. 9.

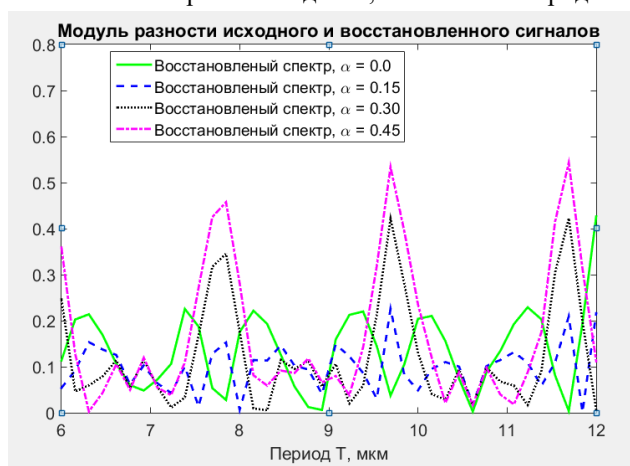


Рис. 9. Модуль разности исходного и восстановленного спектров при разных уровнях фона.

Данный график подтверждает заключение, что даже при наличии фона отклонение восстановленного фона от исходного может быть достаточно мало – не более 15-20%.

## 5. Заключение

В данной работе продемонстрирована принципиальная возможность реализации гиперспектрометра на основе скрещенных дифракционных решёток. Реализовано программное обеспечение для моделирования работы гиперспектрометра на реальных аэрофотоснимках с наложенным ярким источником излучения с заданным спектральным распределением. Исследовано влияние интенсивности фонового окружения на качество восстановления спектра. Следует отметить высокую производительность моделирования гиперспектрального изображения благодаря использованию алгоритма БПФ, а также высокую скорость восстановления спектра, обусловленную применением исключительно арифметических операций.

Программное обеспечение для обработки результатов моделирования гиперспектрального изображения имеет широкие возможности для цифрового улучшения качества восстановления спектрального распределения. Особо стоит отметить метод снятия спектра, пространственно расположенного параллельно основному, что даёт возможность с некоторыми допущениями выявить спектр фонового изображения под точечным источником и учесть его вклад.

## Литература

- [1] Конспект лекций учебной дисциплины «Оптические методы и приборы для научных исследований» / Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ., кафедра ОЭС. 2014, 198 с.

- [2] Скиданов, Р.В. Двухдиапазонная дифракционная решётка для спектрометра на основе схемы Оффнера / Р.В. Скиданов, В.А. Бланк // Компьютерная оптика. – Т. 40, № 6. – С.968-971. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-968-971.
- [3] Донец, В.В. Моноблочные конструкции бортовых и полевых гиперспектрометров / В.В. Донец, А.Ю. Цымбал, В.В. Бровченко // ISSN 1561-8889. Космическая наука и технологии. 2012. Т. 18. № 4. С. 37–44.
- [4] Горда, С. Ю. Современные астрономические спектрометры и методы обработки спектрограмм / [учеб. пособие] / С. Ю. Горда; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер.ун-т. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 91 с. ISBN 978-5-7996-1409-6.
- [5] Introduction to Hyperspectral Image Analysis, Peg Shippert, Ph.D. Earth Science Applications Specialist, Research Systems, Inc.
- [6] Орлов, А.Г. Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазонов / автореф. дис. ... канд техн. наук, Институте химической физики РАН имени Н.Н. Семенова, Москва, 2008.