

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОБРАЖЕНИЯ ФУРЬЕ-ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА В ВИДИМОМ И БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ

Докт. техн. наук АРТЮХИНА Н. К.¹⁾, магистры техн. наук КЛИМОВИЧ Т. В.²⁾, КОТОВ М. Н.²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾ОАО «Пеленг», Беларусь

E-mail: kotov@peleng.by

EXPERIMENTAL STUDIES IN THE FOURIER TRANSFORM-IMAGING SPECTROMETERS IN THE VISIBLE AND NEAR-IR

ARTIUKHINA N. K.¹⁾, KLIMOVICH T. V.²⁾, KOTOV M. N.²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University,

²⁾JSC "Peleng", Belarus

Исследованы основные параметры макета статического Фурье-видеоспектрометра дистанционного зондирования Земли из космоса. Выполнено макетирование данного видеоспектрометра, получены изображения, на основании которых измерены такие параметры системы, как отношение сигнал/шум, частотно-контрастная характеристика, а также проведено спектральное соответствие восстанавливаемых изображений.

Ключевые слова: Фурье-видеоспектрометр, макет, дистанционное зондирование Земли, спектр.

Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

The paper considers basic model parameters of a static imaging Fourier spectrometer for Earth remote sensing from space. Design of the imaging spectrometer model has been developed and images have been obtained in the paper. The images have made it possible to determine such parameters as ratio of signal/noise, frequency/contrast characteristic and spectral coincidence of reconstructed images.

Keywords: Fourier imaging spectrometers, model, Earth remote sensing, spectrum.

Fig. 6. Tab. 1. Ref. 6 titles.

Введение. Проблема создания оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса нового поколения, ориентированной на внутренний и внешний рынки, актуальна для современного оптического приборостроения. Требования потребителей к космическим снимкам земной поверхности постоянно изменяются в сторону повышения их информативности. Видеоспектрометры, предназначенные для работы на борту космического аппарата (КА), способны обеспечить наблюдение территорий с высоким спектральным разрешением. Создание и использование подобных систем – одна из тенденций развития современных систем ДЗЗ, что подтверждается многочисленными публикациями, тематическими конференциями, а также содержанием космических программ различных государств и международных агентств. В настоящее время в связи с увеличением быстродействия матричных фотоприемников и бортовой электроники возрос интерес к разработке спектральной аппаратуры ДЗЗ на основе статическо-

го Фурье-видеоспектрометра (СФВС) [1–3]. Она обладает существенными преимуществами перед остальными видами [4, 5].

Принцип работы данного прибора основан на разделении излучения от объекта, придании двум пучкам строго определенной разности фаз в зависимости от угла наблюдения и дальнейшей интерференции пучков. Основа Фурье-спектроскопии [5] представлена уравнением

$$i(\sigma) = \text{const} \int_0^{\infty} \left[I_{\text{инт}}(L) - \frac{1}{2} I_{\text{инт}}(0) \right] \cos(2\pi\sigma L) dL, \quad (1)$$

где $i(\sigma)$ – спектральная плотность излучения; $I_{\text{инт}}$ – интенсивность первичной волны в одном из плеч интерферометра; L – оптическая разность хода двух интерферирующих пучков.

Зная зависимость интенсивности $I_{\text{инт}}(L)$ в интерферограмме, при помощи формулы (1) можно получить информацию о спектральном составе излучения. В СФВС интерферограмма образуется и регистрируется на светочувствительном матричном фотоприемнике в виде непо-

движных интерференционных изображений. В Фурье-спектроскопии можно выделить два этапа: создание интерферограммы исследуемого излучения с помощью двухлучевого интерферометра и получение информации о спектре путем компьютерной обработки интерферограммы.

В [6] представлено описание математической модели СФВС ДЗЗ, разработанной авторами, приведены результаты исследования. Математическая модель служит для проведения расчетов и оптимизации энергетических, изображающих, точностных характеристик и параметров съемки, а также практической отработки технологии производства и алгоритмов восстановления спектров видеоспектрометра ДЗЗ из космоса.

Цель работы – исследовать характеристики изображения СФВС в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах для подтверждения верности построенной математической модели путем макетирования СФВС.

Разработка макета статического Фурье-видеоспектрометра. Макет СФВС представляет собой прибор, позволяющий отработать основные схемно-технические решения, провести экспериментальную отработку изображающего СФВС в видимом и ближнем ИК-диапазоне. Работы по созданию макета видеоспектрометра ДЗЗ выполняли в ОАО «Пеленг». Структурная схема макета СФВС представлена на рис. 1.

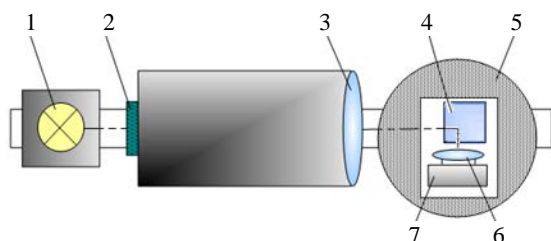


Рис. 1. Схема макета СФВС

Излучение от источника света 1 освещает тест-объект 2, находящийся в фокальной плоскости объектива коллиматора 3, который имеет фокусное расстояние $f'_k = 650$ мм и поле зрения $2\omega_k = 2,5^\circ$. В фокальной плоскости установлена круглая диафрагма, имитирующая протяженный источник света. Для равномерного освещения диафрагмы использовано матовое стекло. Далее излучение направляется на интерферометр, построенный по схеме интерферометра Саньяка (стеклянная призма). С помощью объектива 6 изображение тест-объекта 2 фокусируется на матричном фотоприемнике 7.

Макет СФВС устанавливали на поворотный столик, который служил для полного использования поля зрения и имитации движения прибора ДЗЗ по орбите относительно снимаемой сцены с целью формирования полной интерферограммы. Он обеспечивал точность установки углового положения $10''$, в то время как предельное значение для смещения изображения на 1 пиксель составляло в макете $20''$. Внешний вид макета Фурье-видеоспектрометра представлен на рис. 2.

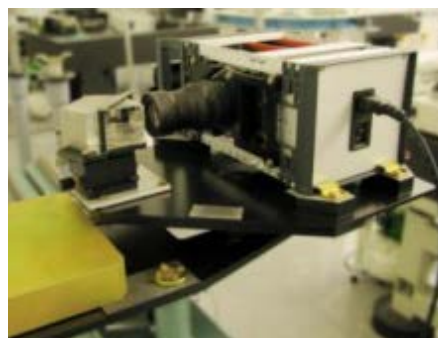


Рис. 2. Внешний вид макета Фурье-видеоспектрометра

Основные технические характеристики макета:

- рабочий спектральный диапазон, мкм: 0,4–1,0;
- фокусное расстояние объектива, мм: 100;
- относительное отверстие объектива: 1:3;
- угловое поле зрения 2ω , град.: 5;
- приращение фазы Фурье-спектрометра в фокальной плоскости, нм/пиксель: 29,38.

Описание данных, получаемых с макета статического Фурье-видеоспектрометра. При настройке и определении характеристик макета Фурье-видеоспектрометра, а также для отработки алгоритма восстановления спектра объектов по интерферограмме в качестве спектральных тест-объектов были использованы стандартные светофильтры с известными характеристиками пропускания. Интерферограммы равномерных источников с различными спектральными составами излучения представлены на рис. 3.

Для восстановления спектра объекта наблюдения из изображения интерферограммы выбрана одна строка, содержащая ее профиль. Уровень сигнала в краевой зоне интерферограммы падает (рис. 4а) по причине срезания пучков лучей, падающих на входную грань интерферометра под углами, большими расчетных. Для выравнивания уровня вычисляли

усредненный по большому числу пикселей профиль интерферограммы, который использовали для корректировки (рис. 4б).

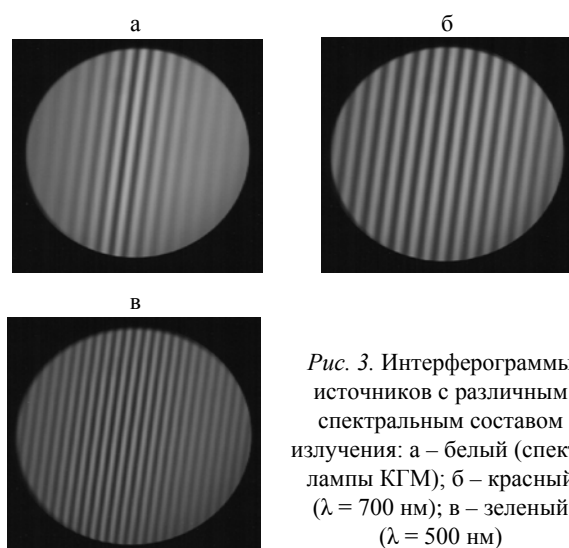


Рис. 3. Интерферограммы источников с различным спектральным составом излучения: а – белый (спектр лампы КГМ); б – красный ($\lambda = 700$ нм); в – зеленый ($\lambda = 500$ нм)

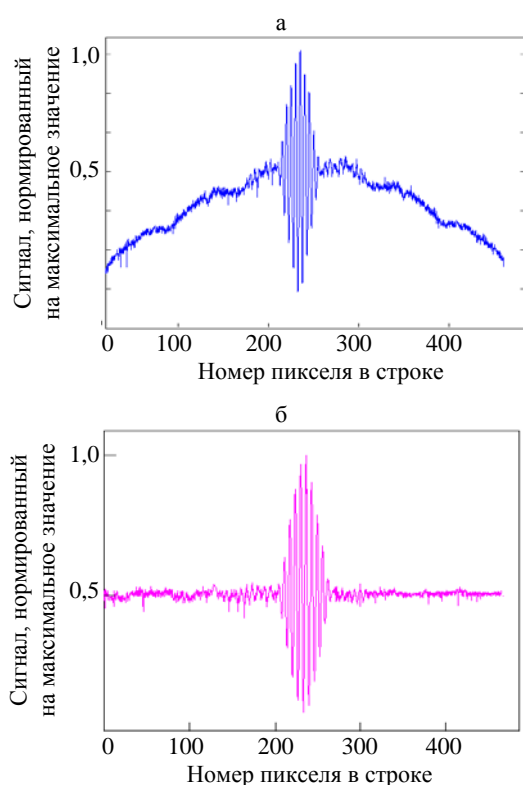


Рис. 4. Профиль интерферограммы до (а) и после (б) выравнивания

К сформированной таким образом интерферограмме применяли алгоритм, основанный на быстром преобразовании Фурье. Восстановленный график спектра с использованием треугольной аподизационной функции представлен на рис. 5.

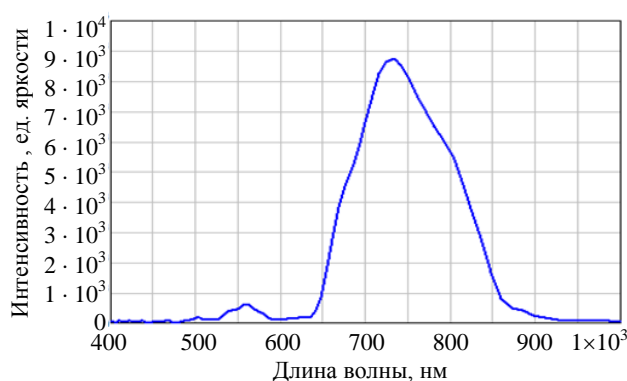


Рис. 5. Восстановленный спектр с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье

Определение частотно-контрастных характеристик СВФС проводили по статической интерферограмме тест-объекта стандартной прямоугольной меры для разных пространственных частот объекта и в различных участках интерферограммы. Полученные данные показывают, что с уменьшением пространственной частоты сокращается разность между значениями контраста изображения в центральной и краевой зонах интерферограммы. При освещении тест-объекта источником света в широком спектральном диапазоне контраст изображения на частоте Найквиста равен 0,31 – в центральной части интерферограммы и 0,2 – в краевой, а на частоте 1/2 от частоты Найквиста – 0,48 и 0,42 соответственно. Также обработка краевой зоны интерферограммы, в случае широкого спектра, приводит лишь к накоплению шумовой составляющей по причине отсутствия когерентности естественного излучения.

Измерение отношения сигнал/шум проводилось при съемке равномерного по полю источника света. Величины данного параметра для спектра, формируемого фильтром ПС-7, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Отношение сигнал/шум в различных зонах интерферограммы при наблюдении источника, сформированного фильтром ПС-7

Разность хода, мкм (номер пикселя в строке интерферограммы)	0 (0)	3 (102)	7 (238)	12 (408)
Отношение сигнал/шум в интерферограмме	205	135	140	129

Следует отметить, что имеет место наклон полос по отношению к столбцам фотоприемника (ФП). Это явление вызвано клиновидностью призмы и не приводит к существенным трудностям. Для устранения его влияния была определена величина угла наклона полос и в алгоритм введена соответствующая поправка в значение приращения разности хода на 1 пиксель.

При измерении спектров узких светофильтров выявлено смещение до 5–10 нм максимумов спектральных характеристик по сравнению с теоретическим положением, что можно объяснить влиянием дисперсии материала призмы на приращение разности хода на 1 пиксель, т. е. шаг дискретизации интерферограммы на различных длинах волн. Действительно, расчет по числу интерференционных полос показал различные значения приращения разности хода. В соответствии с этим была построена калибровочная кривая, которую использовали для корректировки алгоритма. Примеры скорректированных спектральных характеристик объектов приведены на рис. 6.

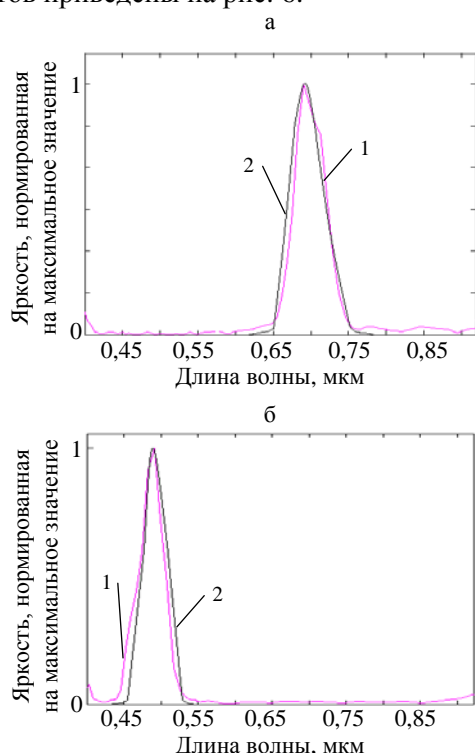


Рис. 6. Измеренный (кривая 1) и теоретический (кривая 2) профили пропускания узкополосных светофильтров после калибровки: а – длина волны 0,7 мкм; б – 0,5 мкм

ВЫВОДЫ

Сравнение данных, полученных при макетировании [6] и моделировании, показывает, что информативность изображений по таким критериям, как отношение сигнал/шум и значение функции передачи модуляции, в целом совпадают. При исследовании данных с макета СФВС проводилось энергетическое выравнивание спектра из-за наличия виньетирования в оптической схеме макета. Для калибровки СВФС необходимо учитывать влияние дисперсии материала призмы интерферометра на приращение разности хода.

По результатам математического моделирования и макетирования можно выделить следующие направления дальнейших исследований:

- в части элементной базы: подбор ФП с более равномерной характеристикой спектральной чувствительности в рабочем спектральном диапазоне;
- в части математического моделирования: уточнение энергетических расчетов, определение предельных характеристик;
- в части макетирования статического Фурье-видеоспектрометра: разработка и практическая отработка алгоритма формирования гиперспектрального параллелепипеда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еремеев, В. А. Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных / В. А. Еремеев, И. Н. Мордвинцев, Н. Г. Платонов // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 6. – С. 80–90.
2. Мальцев, Г. Н. Космические системы и технологии многоспектрального дистанционного зондирования Земли / Г. Н. Мальцев, И. А. Козинов, А. П. Данилкин // Информация и космос. – 2010. – № 1. – С. 148–158.
3. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли / Г. Г. Горбунов [и др.] // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 75–82.
4. Тонков, М. В. Фурье-спектроскопия – максимум информации за минимум времени / М. В. Тонков // Сорковский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 83–88.
5. Белл, Р. Дж. Введение в Фурье-спектроскопию / Р. Дж. Белл; пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 380 с.
6. Артюхина, Н. К. Математическое моделирование Фурье-видеоспектрометра / Н. К. Артюхина, Т. В. Климович, М. Н. Котов // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1 (4). – С. 24–29.

REFERENCES

1. Eremeyev, V. A., Mordvintsev, I. N., & Platonov, N. G. (2003) Modern Hyper-Spectral Sensors and Methods for Processing Hyper-Spectral Data. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa [Investigation of Earth From Space]*, 6, 80–90.
2. Maltsev, G. N., Kozinov, I. A., & Danilkin, A. P. (2010) Space Systems and Technologies of Multi-Spectral Remote Sensing of the Earth. *Informatsia i Kosmos [Information and Space]*, 1, 148–158.
3. Gorbunov, G. G., Demin, A. V., Nikiforov, V.O., Savitskii, A. M., Skvortsov, Iu. S., Sokol'skii, M. N., & Tregub, V. P. (2009) Hyperspectral Apparatus for Remote Sensing of the Earth. *Optichesky Zhurnal [Optical Journal]*, 76 (10), 75–82.
4. Tonkov, M. V. (2001) Fourier-Spectroscopy – Maximum Data for Minimum Time. *Sorovsky Obrazovatelny Zhurnal [Sorovsky Educational Journal]*, 7 (1), 83–88.
5. Bell, R. J. (1972) *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*. New York, Academic Press, 380 p. (Russ. ed.: Bell, R. J. (1975). *Vvedenie v Fur'e-Spektroskopiiu*. Moscow: World, 380 p.).
6. Artiukhina, N. K., Klimovich, T. V., & Kotov, M. N. (2012) Mathematical Simulation of Fourier Imaging Spectrometer. *Pribory i Metody Izmereniy [Instruments and Methods of Measurement]*, 1 (4), 24–29.

Поступила 28.04.2014