

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.397.3:543.42:004.94

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).680-687

ГРНТИ 47.51.39+50.51.19

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А., Быстров Н. Е.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)*

Аннотация В статье рассматриваются вопросы компьютерного моделирования процессов формирования спектральных изображений в гиперспектральной системе на основе интерферометра Фабри-Перо, предназначенной для работы в видимом диапазоне спектра. Рассматривается математическая модель гиперспектральной системы и ее основные варьируемые параметры для оценки получаемых характеристик спектральной избирательности. Приводится структурная схема, иллюстрирующая процесс моделирования. Приводятся результаты компьютерного моделирования. Приводятся характеристики спектральной избирательности, полученные при компьютерном моделировании, в зависимости от величины воздушного зазора между зеркальными пластинами интерферометра Фабри-Перо, при фиксированном угле падения лучистого потока. Показана возможность одноканальной и трехканальной регистрации спектральных откликов интерферометра, соответствующих RGB каналам стандартного цветного матричного фотоприемника. Анализируются варианты структурных схем гиперспектральной системы, исходя из имеющихся компромиссов между чувствительностью системы, ее спектральной избирательностью, быстродействием, точностью, разрешающей способностью и сложностью реализации.

Ключевые слова: гиперспектральная система, Фабри-Перо интерферометр, компьютерное моделирование

Для цитирования: Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А., Быстров Н. Е. Компьютерное моделирование процесса формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри-Перо // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 680-687. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).680-687

Research Article

COMPUTER SIMULATION OF THE IMAGING PROCESS IN A HYPERSPECTRAL SYSTEM BASED ON THE FABRY-PEROT INTERFEROMETER

Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A., Bystrov N. E.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article deals with the issues of computer simulation of the processes of spectral image formation in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer, designed to work in the visible spectrum. A mathematical model of a hyperspectral system and its main variable parameters for evaluating the obtained characteristics of spectral selectivity are considered. A block diagram illustrating the simulation process is given. The results of computer simulation are presented. The characteristics of spectral selectivity obtained by computer simulation are given, depending on the air-gap distance between the mirror plates of the Fabry-Perot interferometer at a fixed angle of incidence of the radiant flux. The possibility of single-channel and three-channel registration of spectral responses of the interferometer corresponding to RGB

channels of a standard color matrix photodetector is shown. The variants of the structural schemes of the hyperspectral system are analyzed based on the existing compromises between the sensitivity of the system, its spectral selectivity, speed, accuracy, resolution, and complexity of implementation.

Keywords: hyperspectral system, Fabry–Perot interferometer, computer simulation

For citation: Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A., Bystrov N. E. Computer simulation of the imaging process in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 680-687. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).680-687

Введение

Гиперспектральные системы (ГСС) на базе интерферометра Фабри-Перо (ФПИ) [1] представляют наибольший интерес по отношению к гиперспектральным системам, реализованным другими способами, например, на призме, дифракционной решетке, на оптическом полосовом фильтре или интерферометрах Саньяка, Маха-Цендера, Майкельсона [2-7]. ГСС на базе ФПИ имеют целый ряд преимуществ: широкий спектральный интервал, высокую светосилу, сравнительную простоту конструкции, малые габариты и массу, высокую надежность. Вместе с тем формирование спектральных изображений в данной ГСС имеет свою специфику.

Целью настоящей статьи является рассмотрение результатов компьютерного моделирования процессов формирования спектральных изображений в ГСС на базе ФПИ.

Теоретическая часть

Формирование спектральных изображений осуществляется путем регулировки размера воздушного зазора интерферометра при помощи электрически управляемых пьезоактюаторов. С одной стороны, применение пьезоактюаторов позволяет минимизировать массо-габаритные характеристики ГСС, а, с другой стороны, электрическое управление позволяет обеспечить высокую точность регулировки величины воздушного зазора между зеркальными поверхностями интерферометра и, соответственно, высокую спектральную избирательность ГСС в целом.

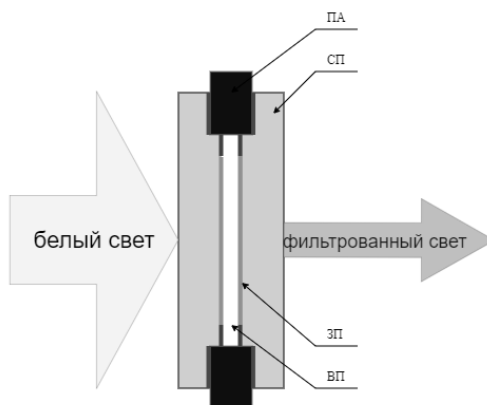


Рисунок 1. Принцип работы ФПИ: СП – стеклянная пластинка; ЗП – зеркальная поверхность; ВЗ – воздушный зазор; ПА – пьезоактюатор

Принцип работы ФПИ для видимого диапазона спектра поясняется рисунком 1. В ФПИ лучистый поток в диапазоне 400–700нм (белый свет), проходит через параллельные стеклянные (СП) пластины, внутренние поверхности которых являются зеркальными. СП разделены воздушным (ВЗ) зазором. СП соединены между собой при помощи пьезоактюаторов (ПА), которые используются для регулировки воздушного зазора путем подачи соответствующего электрического напряжения.

Математической моделью для компьютерного моделирования является выражение для спектральной избирательности ГСС (1), которая определяется углом падения θ лучистого потока и величиной воздушного зазора d :

$$T(\lambda) = \frac{(1 - R)^2}{1 + R^2 - 2 \cdot R \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(\theta)}{\lambda}\right)}, \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения зеркальной поверхности и [1].

Таким образом, входными параметрами модели являются параметры R , θ и d , выходным параметром является $T(\lambda)$, при этом варьируемыми параметрами являются параметры θ и d .

Моделирование процесса формирования изображений в ГСС на базе ФПИ проиллюстрировано на рисунке 2 в виде структурной схемы.

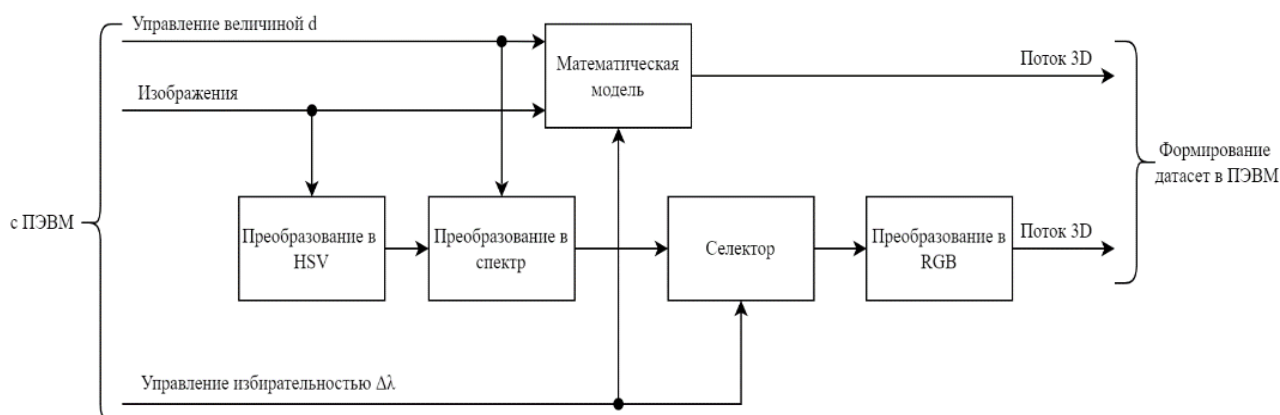


Рисунок 2. Структурная схема процесса моделирования ГСС на базе ФПИ

Методика эксперимента

При компьютерном моделировании изменялась величина воздушного зазора d , при фиксированном угле падения, а также параметр избирательности $\Delta\lambda$. Процесс моделирования включает в себя выполнение преобразований стандарта RGB в стандарт HSV для имитации спектральных изображений, спектральную селекцию и формирование гиперкуба данных (поток 3D).

Результаты и обсуждение

При компьютерном моделировании было показано, что количество полос пропускания, определяющее характер спектральной избирательности, зависит от

диапазона изменения величины воздушного зазора d . Так, например, при изменении величины воздушного зазора d в интервале от 200 нм до 400 нм характер спектральной избирательности ФПИ и, соответственно, ГСС в целом является одноканальным. На рисунке 3 показан результат моделирования спектральной $T(\lambda)$ избирательности ГСС для величины воздушного зазора $d = 205$ нм и $d = 210$ нм при угле падения лучистого потока $\theta = 5^\circ$.

Вместе с тем, при изменении величины воздушного зазора d в интервале от 800 нм до 1200 нм характер спектральной избирательности ФПИ и, соответственно, ГСС в целом оказывается трехканальным. На рисунке 4 показан результат моделирования спектральной $T(\lambda)$ избирательности ГСС для величины воздушного зазора $d = 1050$ нм и $d = 1060$ нм при фиксированном угле падения лучистого потока $\theta = 5^\circ$.

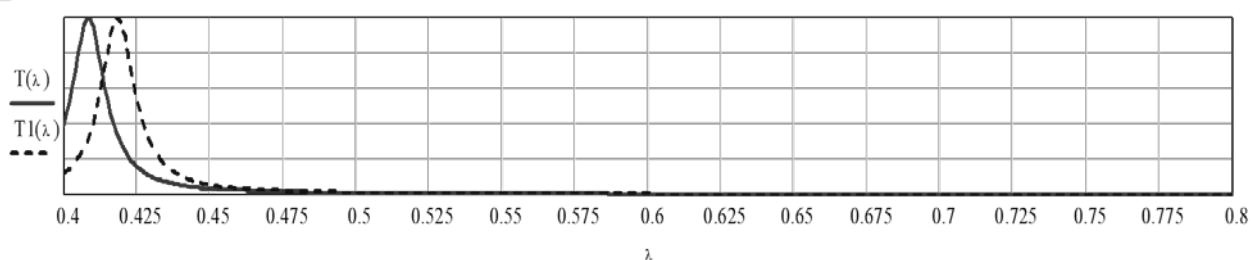


Рисунок 3. Спектральная избирательность ГСС на базе ФПИ при изменении воздушного зазора d в интервале от 200 нм до 400 нм для $d = 205$ нм, кривая $T(\lambda)$ и для $d = 210$ нм, кривая $T1(\lambda)$ при фиксированном угле падения лучистого потока $\theta = 5^\circ$

При этом, как видно из рисунков 3 и 4, характер спектральной избирательности ГСС на базе ФПИ при изменении величины воздушного зазора d отличается не только числом спектральных каналов, но и шириной их полосы пропускания. Причем, при одноканальном характере спектральная избирательность ГСС более низкая, чем при ее трехканальном характере. Кроме того, при трехканальном характере спектральная избирательность неравномерна по всему спектральному диапазону: она ухудшается по мере увеличения длины волны лучистого потока.

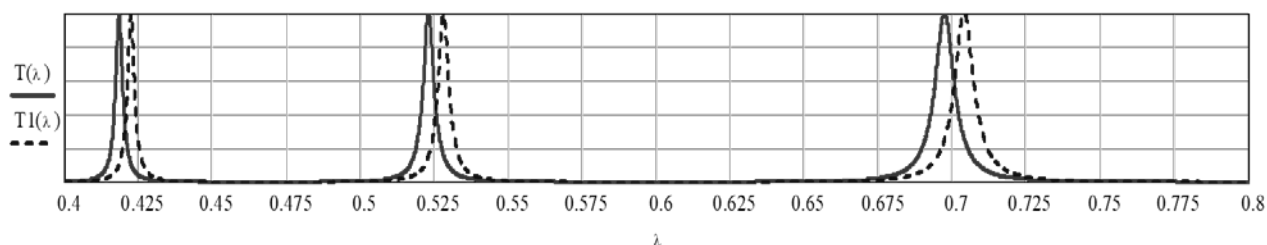


Рисунок 4. Спектральная избирательность ГСС на базе ФПИ при изменении воздушного зазора d в интервале от 800 нм до 1200 нм для $d = 1050$ нм, кривая $T(\lambda)$ и для $d = 1060$ нм, кривая $T1(\lambda)$ при фиксированном угле падения лучистого потока $\theta = 5^\circ$

Результаты моделирования спектральной избирательности по границам видимого диапазона спектра приведены в таблице 1. На основании данных таблицы

можно сделать вывод о том, что в ГСС на базе ФПИ значение спектральной избирательности при одноканальном характере практически в четыре раза хуже, по сравнению с ГСС на базе ФПИ при трехканальном характере спектральной избирательности. Независимо от характера спектральной избирательности происходит ее ухудшение с ростом длины волны и достигает примерно двукратного значения от начала спектрального диапазона к его концу.

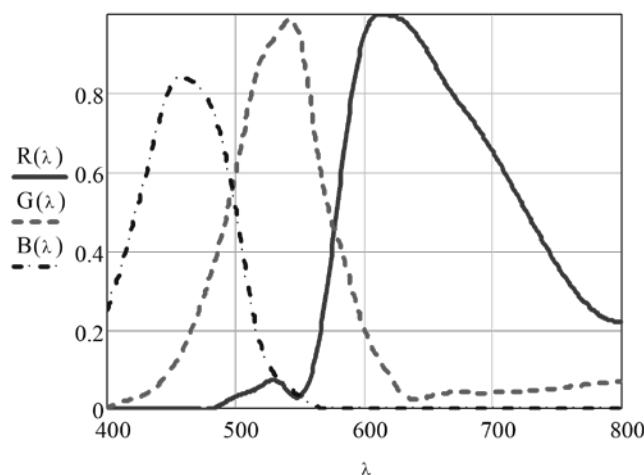


Рисунок 5. Спектральные характеристики *RGB* каналов для стандартного цветного одноматричного фотоприемника

Как видно из рисунков 4 и 5, спектральные отклики ФПИ лежат в диапазонах, соответствующих *RGB* каналам стандартной цветной телевизионной камеры, что обеспечивает возможность получения трех откликов одновременно, и, соответственно, повышает быстродействие ГСС за счет увеличения скорости сканирования по спектральному диапазону.

Таблица 1. Зависимость спектральной избирательности от величины воздушного зазора *d*

Диапазон изменения <i>d</i> , нм	Спектральная избирательность, нм	
	Начало диапазона	Конец диапазона
200 – 400, одноканальный характер	9	19
800 – 1200, трехканальный характер	2	5

Таким образом, появляется возможность построения ГСС на базе ФПИ по двум вариантам: первый – с использованием черно-белой телевизионной камеры при одноканальном отклике от ФПИ и второй – с использованием цветной телевизионной камеры при трехканальном отклике от ФПИ. Выбор варианта осуществляется исходя из компромисса между контрастной чувствительностью системы, спектральной избирательностью, быстродействием и сложностью реализации.

Действительно, использование одноматричных цветных фотоприемников во втором варианте, с одной стороны, повышает спектральную избирательность и быстродействие ГСС, однако, влечет за собой ухудшение в два раза

чувствительности при фиксированной пространственной разрешающей способности или, наоборот, ухудшение в два раза пространственной разрешающей способности при фиксированной чувствительности, определяемой размером элемента фоточувствительной матрицы. Кроме этого, использование цветных фотоприемников усложняет алгоритм обработки сигналов спектральных откликов от соответствующих *RGB* каналов.

Использование черно-белых матричных фотоприемников в первом варианте обеспечивает по сравнению со вторым вариантом более простое техническое решение данной задачи, а также более высокую чувствительность при фиксированной пространственной разрешающей способности или более высокую пространственную разрешающую способность при фиксированной чувствительности. Однако, при этом снижается быстродействие ГСС в формировании так называемого «гиперкуба данных». Кроме этого, в данном варианте диапазон изменения величины воздушного зазора существенно меньше, что, в свою очередь, требует более высокой точности регулировки ее величины.

Выводы

Построения ГСС на базе ФПИ возможно по двум вариантам: 1) с использованием черно-белой телевизионной камеры при одноканальном отклике от ФПИ или 2) с использованием цветной телевизионной камеры при трехканальном отклике от ФПИ.

Выбор варианта для реализации осуществляется исходя из компромисса между контрастной чувствительностью системы, спектральной избирательностью, быстродействием и сложностью реализации в соответствии имеющимися критериями качества.

Список литературы

1. Pisani M., Zucco M. Fourier transform based hyperspectral imaging // Fourier Transforms – approach to Scientific Principles / Edited by G. Nikolic. Rijeka (Croatia), 2011. P. 427-446. DOI: 10.5772/15464
2. Nie Y., Xiangli B., Zhou J., Wei X. Design of airborne imaging spectrometer based on curved prism // International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments, 6-9 november 2011. Beijing (China), 2011. Vol. 8197. P. 81970U. DOI:10.1117/12.904270
3. Zhou G., Cheo K. K. L., Du Y., Chau F. S., Feng H., Zhang Q. Hyperspectral imaging using a microelectrical-mechanical-systems-based in-plane vibratory grating scanner with a single photodetector // Optics Letters. 2009. 34(6). 764-766. DOI: 10.1364/ol.34.000764
4. Gat N. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2000. 4056. 50-64. DOI: 10.1117/12.381686
5. Barducci A., Guzzi D., Lastrì C., Marcoionni P., Nardino V., Pippi I. Theoretical aspects of Fourier transform spectrometry and common path triangular interferometers // Optics Express. 2010. 18(11). 11622-11649. DOI: 10.1364/OE.18.011622

6. Naylor D. A., Gom B. G. SCUBA-2 imaging Fourier transform spectrometer // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2004. 5159. 91-101. DOI: 10.1117/12.506395

7. Alcock R., Coupland J. A compact, high numerical aperture imaging Fourier transform spectrometer and its application // Measurement Science and Technology. 2006. 17(11). 2861-2868. DOI: 10.1088/0957-0233/17/11/001

8. Бельский А. Б. Применение гиперспектрометров для решения задач по обнаружению, распознаванию объектов в составе вертолетов // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сборник докладов VI Международной научно-практической конференции «АВИАТОР», Воронеж, 14–15 февраля 2019 г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. С. 91-97.

References

1. Pisani M., Zucco M. Fourier transform based hyperspectral imaging // Fourier Transforms – approach to Scientific Principles / Edited by G. Nikolic. Rijeka (Croatia), 2011. P. 427-446. DOI: 10.5772/15464

2. Nie Y., Xiangli B., Zhou J., Wei X. Design of airborne imaging spectrometer based on curved prism // International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments, 6-9 november 2011. Beijing (China), 2011. Vol. 8197. P. 81970U. DOI:10.1117/12.904270

3. Zhou G., Cheo K. K. L., Du Y., Chau F. S., Feng H., Zhang Q. Hyperspectral imaging using a microelectrical-mechanical-systems-based in-plane vibratory grating scanner with a single photodetector // Optics Letters. 2009. 34(6). 764-766. DOI: 10.1364/ol.34.000764

4. Gat N. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2000. 4056. 50-64. DOI: 10.1117/12.381686

5. Barducci A., Guzzi D., Lastrì C., Marconi P., Nardino V., Pippi I. Theoretical aspects of Fourier transform spectrometry and common path triangular interferometers // Optics Express. 2010. 18(11). 11622-11649. DOI: 10.1364/OE.18.011622

6. Naylor D. A., Gom B. G. SCUBA-2 imaging Fourier transform spectrometer // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2004. 5159. 91-101. DOI: 10.1117/12.506395

7. Alcock R., Coupland J. A compact, high numerical aperture imaging Fourier transform spectrometer and its application // Measurement Science and Technology. 2006. 17(11). 2861-2868. DOI: 10.1088/0957-0233/17/11/001

8. Bel'skii A. B. Primenenie giperspektrometrov dlia resheniia zadach po obnaruzheniiu, raspoznaniyu ob"ektov v sostave vertoletov [Application of hyperspectrometers in detecting and recognising the objects as part of helicopters] // Aktual'nye voprosy issledovaniy v avionike: teoriia, obsluzhivanie, razrabotki: sbornik dokladov VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «АВИАТОР», Voronezh, 14–15 fevralia 2019 g. [Current issues of research in avionics: theory, maintenance, development. Collection of scientific articles based on the reports of the VI International Scientific and Practical Conference "АVIАТОR" (February 14-15, 2019)]. Voronezh, VUNTs VVS «VVA» Publ. P. 91-97.

Информация об авторах

Гареев Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород), ORCID: 0009-0003-1585-6792, Vladimir.Gareev@novsu.ru

Гареев Михаил Владимирович – ведущий инженер лаборатории «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID 0009-0007-1392-2169, Mikhail.Gareev@novsu.ru

Корнышев Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор, инженер лаборатории «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород), ORCID: 0009-0005-3177-2040, Nikolai.Kornishev@novsu.ru

Серебряков Дмитрий Александрович – инженер лаборатории «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-5994-5090, s231099@std.novsu.ru

Быстров Николай Егорович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-1998-8868, Nikolay.Bystrov@novsu.ru