

СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.397:004.94

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).69-81

Поступила в редакцию / Received 08.01.2025

ГРНТИ 47.51.39+28.17.33

Специальность ВАК 1.3.4.; 2.2.13.

Принята к публикации / Accepted 04.02.2025

Научная статья

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОМОДОВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО И ТРЕХКАНАЛЬНОГО МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНИКА

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

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

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы построения гиперспектральных систем на базе интерферометра Фабри-Перо с использованием матричных фотоприемников, позволяющих при сканировании регистрировать изображения, получаемые от заданной моды. Рассматриваются вопросы расширения диапазона сканирования в одномодовом режиме путем комбинирования светофильтров с широкими зонами регистрации и узкоспектральных зон регистрации, формируемых интерферометром Фабри-Перо. Детально рассматриваются параметры сканирования для нескольких вариантов реализации одномодового режима работы с использованием различных порядков интерференции, обсуждаются результаты их компьютерного моделирования и даются рекомендации по их применению. В статье также подробно рассматриваются вопросы размещения спектральных изображений в оперативном запоминающем устройстве в процессе сканирования при использовании трехканального матричного фотоприемника видимого диапазона спектра. Приводятся соответствующие таблицы, показывающие последовательность размещения спектральных изображений в синем, зеленом и красном каналах от нижней до верхней границы диапазона сканирования.

Ключевые слова: гиперспектральные системы, интерферометр Фабри-Перо, матричный фотоприемник.

Для цитирования: Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Компьютерное моделирование одномодового режима работы гиперспектральной системы на базе интерферометра Фабри-Перо и трехканального матричного фотоприемника // Вестник НовГУ. 2025. 1 (139). 69–81. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).69-81

Research Article

COMPUTER SIMULATION OF SINGLE-MODE OF OPERATION OF A HYPERSPECTRAL SYSTEM BASED ON THE FABRY-PEROT INTERFEROMETER AND A THREE-CHANNEL MATRIX SENSOR

Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A.

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

Abstract. The article discusses the construction of hyperspectral systems based on the Fabry-Perot interferometer using matrix sensor that allow scanning to register images obtained from a given mode. The issues of expanding the scanning range in single-mode mode by combining light filters with wide detection zones and narrow-spectral detection zones formed by the Fabry-Perot interferometer are considered. The scanning parameters for several variants of single-mode operation using different interference orders are considered in detail, the results of their computer simulation are discussed, and recommendations for their application are given. The article also discusses in detail the issues of placing spectral images in RAM during

the scanning process using a three-channel matrix sensor of the visible range of the spectrum. The corresponding tables showing the sequence of spectral images are given.

Keywords: *hyperspectral systems, Fabry-Perot interferometer, matrix sensor.*

For citation: Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Computer simulation of single-mode of operation of a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer and a three-channel matrix sensor // Vestnik NovSU. 2025. 1 (139). 69–81. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).69-81

Введение

Диапазон сканирования $\Delta\lambda = [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ гиперспектральной системы (ГСС) на базе интерферометра Фабри-Перо (ФПИ) [1–7] в одномодовом режиме на заданном порядке m интерференции будет ограничиваться появлением на длине волны λ_{min} моды, соответствующей значению $m+1$. При этом мода m будет находиться на длине волны λ_{max} .

Для порядков интерференции (мод) $1 \leq m \leq n$, где целые n положительные числа, определяющих максимумы пропускания ФПИ на длине волны λ_{min} , соответствующие воздушные зазоры d_{min} m вычисляются по формуле: $d_{min} = \frac{m}{2} \lambda_{min}$.

Максимальный размер воздушного зазора для длины волны λ_{max} , соответствует $d_{max} = \frac{m+1}{2} \lambda_{min} = \frac{m+1}{m} d_{min}$. Таким образом, диапазон изменения воздушного зазора $\Delta d = [d_{min}, d_{max}]$ определяет диапазон сканирования $\Delta\lambda = [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$.

При этом диапазон сканирования определяется расстоянием между модами $m+1$ и m , причем значения λ_{max} вычисляются по формуле $\lambda_{max} m = \frac{2d_{m+1}}{m} = \frac{m+1}{m} \lambda_{min}$.

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме соответствует расстоянию $\Delta\lambda = \lambda_{max} m - \lambda_{min} = \lambda_{min} \left(\frac{m+1}{m} - 1 \right) = \frac{\lambda_{min}}{m}$.

Для спектрального сканирования $T(\lambda)$ в одномодовом режиме при $m > 1$ весь диапазон должен быть ограничен λ_{max} предварительно или в процессе сканирования:

$$T_{out}(\lambda) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} T(\lambda) d(\lambda).$$

В таблице 1 приведены соответствующие выражения для верхней границы сканирования λ_{max} и диапазона сканирования $\Delta\lambda$ в одномодовом режиме при $1 \leq m \leq 6$.

Таблица 1. Диапазоны сканирования $\Delta\lambda = [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ модами $1 \leq m \leq 6$

m	1	2	3	4	5	6
$\lambda_{max} m$	$\lambda_{max1} = 2\lambda_{min}$	$\lambda_{max2} = \frac{3}{2}\lambda_{min} = 1,5\lambda_{min}$	$\lambda_{max3} = \frac{4}{3}\lambda_{min} = 1,3(3)\lambda_{min}$	$\lambda_{max4} = \frac{5}{4}\lambda_{min} = 1,25\lambda_{min}$	$\lambda_{max5} = \frac{6}{5}\lambda_{min} = 1,2\lambda_{min}$	$\lambda_{max6} = \frac{7}{6}\lambda_{min} = 1,16(6)\lambda_{min}$
$\Delta\lambda$	λ_{min}	$0,5\lambda_{min}$	$0,3(3)\lambda_{min}$	$0,25\lambda_{min}$	$0,2\lambda_{min}$	$0,16(6)\lambda_{min}$

Максимальное число n_{max} шагов сканирования в диапазонах $\Delta\lambda = [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ определится по формуле $n_{max} = \frac{d_{max} - d_{min}}{\delta d}$.

В рассматриваемых случаях число $n_{max} = \frac{0,5\lambda_{min}}{\delta d} = \text{const}$. При этом промежуточное положение моды определится воздушным зазором $d = d_{min} + n\delta d$, где n – число шагов сканирования.

В таблице 2 приведены соответствующие выражения для $d_{min} m$ и $d_{max} m$ при $1 \leq m \leq 6$.

Таблица 2. Величины зазоров $d_{min} m$ и $d_{max} m$ для мод $1 \leq m \leq 6$

m	1	2	3	4	5	6
$d_{min} m$	$d_{min1} = \frac{\lambda_{min}}{2} = 0,5\lambda_{min}$	$d_{min2} = \lambda_{min}$	$d_{min3} = \frac{3}{2}\lambda_{min} = 1,5\lambda_{min}$	$d_{min4} = 2\lambda_{min}$	$d_{min5} = \frac{5}{2}\lambda_{min} = 2,5\lambda_{min}$	$d_{min6} = 3\lambda_{min}$
$d_{max} m$	$d_{max1} = \lambda_{min}$	$d_{max2} = \frac{3}{2}\lambda_{min} = 1,5\lambda_{min}$	$d_{max3} = 2\lambda_{min}$	$d_{max4} = \frac{5}{2}\lambda_{min} = 2,5\lambda_{min}$	$d_{max5} = 3\lambda_{min}$	$d_{max6} = \frac{7}{2}\lambda_{min} = 3,5\lambda_{min}$

Ниже на рисунках 1–5 приведены иллюстрации спектральных характеристик $T(\lambda)$ для момента достижения λ_{max} при сканировании в одномодовом режиме видимого диапазона спектра с порядками интерференции $1 \leq m \leq 6$. Рисунки слева – без ограничения на λ_{max} , рисунки справа – с ограничением на λ_{max} .

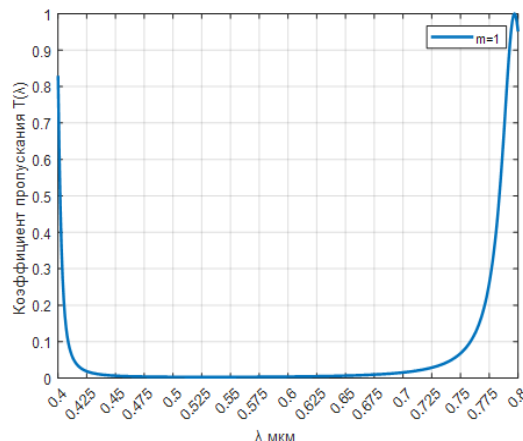
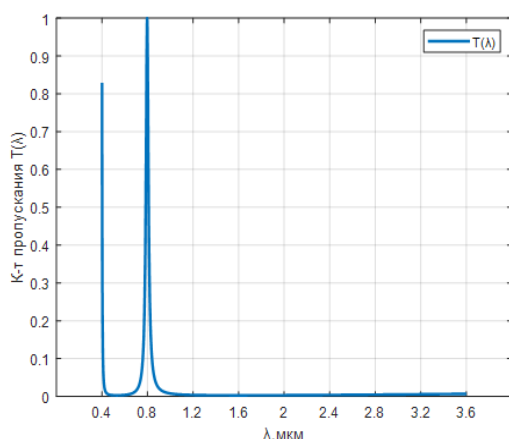


Рисунок 1. Иллюстрация сканирования в одномодовом режиме с порядком интерференции $m=1$ от $\lambda_{min}=0,4$ мкм при $d_{min}=0,2$ мкм до $\lambda_{max}=0,8$ мкм при $d_{max}=0,4$ мкм с ограничением диапазона, связанном с появлением на λ_{min} моды $m=2$

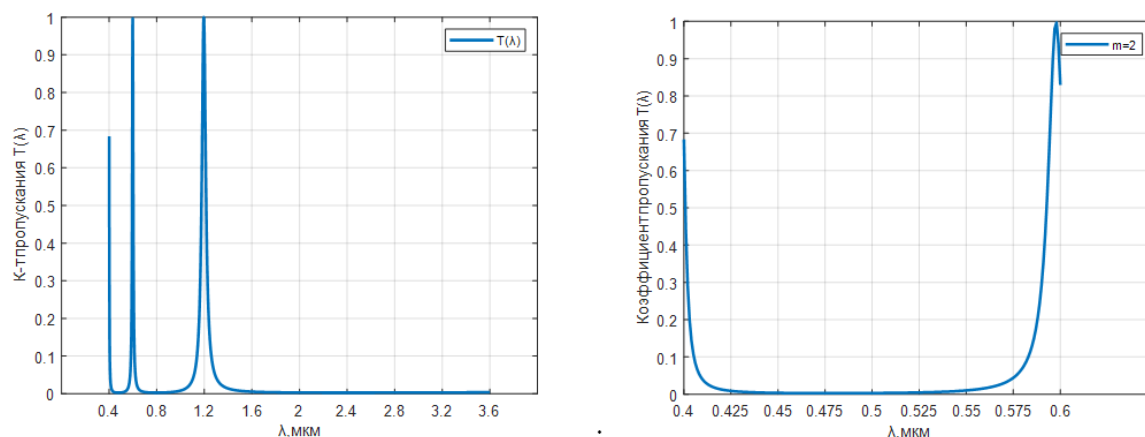


Рисунок 2. Иллюстрация сканирования в одномодовом режиме с порядком интерференции $m=2$ от $\lambda_{min}=0,4$ мкм при $d_{min}=0,4$ мкм до $\lambda_{max}=0,6$ мкм при $d_{max}=0,6$ мкм с ограничением диапазона, связанным с появлением на λ_{min} моды $m=3$

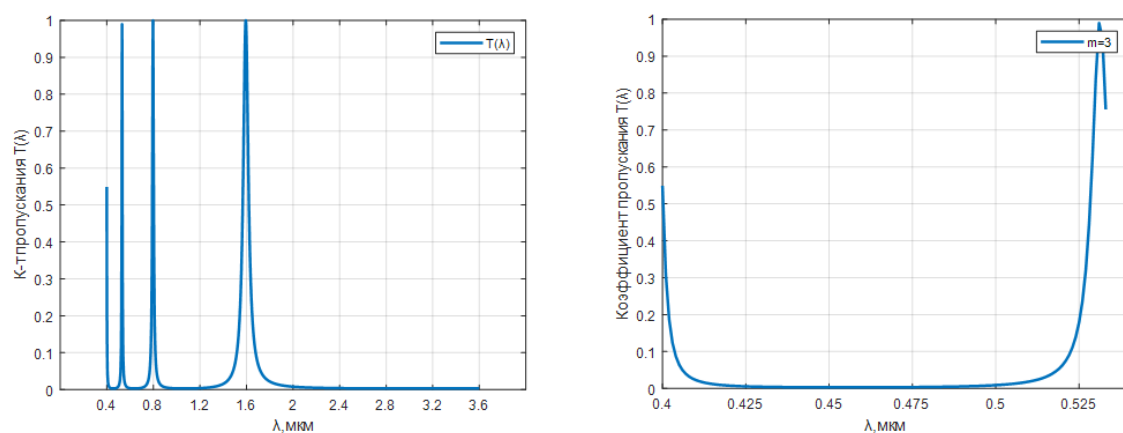


Рисунок 3. Иллюстрация сканирования в одномодовом режиме с порядком интерференции $m=3$ от $\lambda_{min}=0,4$ мкм при $d_{min}=0,6$ мкм до $\lambda_{max}=0,533(3)$ мкм при $d_{max}=0,8$ мкм с ограничением диапазона, связанным с появлением на λ_{min} моды $m=4$

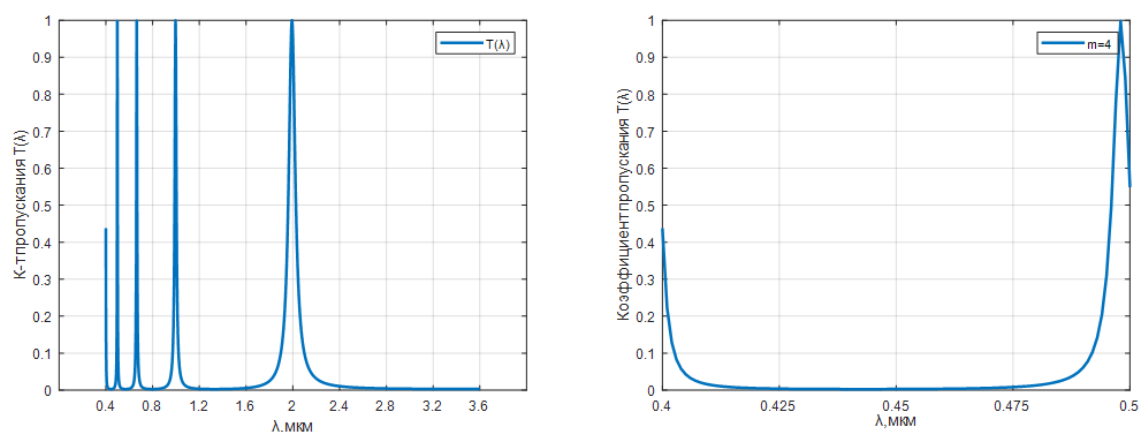


Рисунок 4. Иллюстрация сканирования в одномодовом режиме с порядком интерференции $m=4$ от $\lambda_{min}=0,4$ мкм при $d_{min}=0,8$ мкм до $\lambda_{max}=0,5$ мкм при $d_{max}=1,0$ мкм с ограничением диапазона, связанным с появлением на λ_{min} моды $m=5$

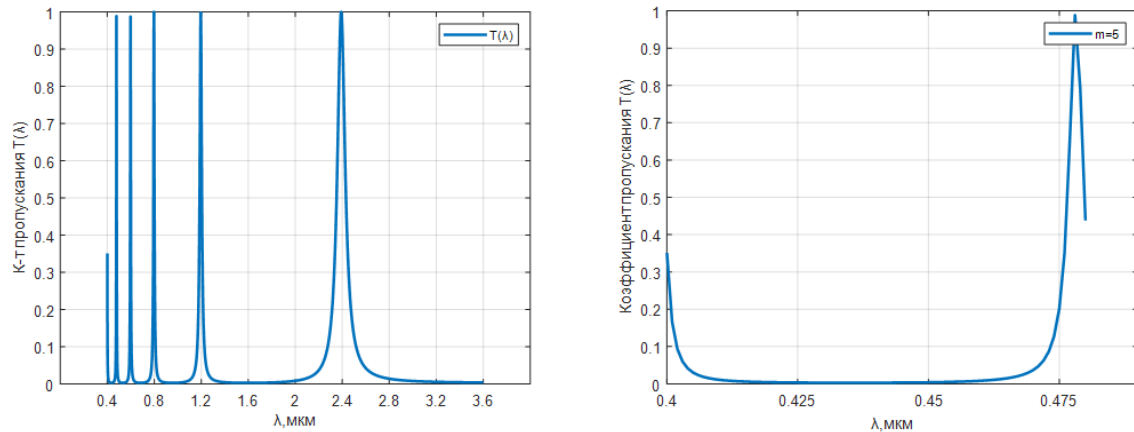


Рисунок 5. Иллюстрация сканирования в одномодовом режиме с порядком интерференции $m=5$ от $\lambda_{min}=0,4$ мкм при $d_{min}=1,0$ мкм до $\lambda_{max}=0,48$ мкм при $d_{max}=1,2$ мкм с ограничением диапазона, связанном с появлением на λ_{min} моды $m=6$

Как видно из рисунков, сканирование всего видимого диапазона 0,4–0,7 мкм в одномодовом режиме обеспечивается только на первом порядке интерференции (мода $m=1$). Таким образом, возникает задача расширения диапазона сканирования в одномодовом режиме на порядках интерференции $m>1$.

Одним из известных методов возможного расширения диапазона сканирования является комбинирование светофильтров с широкими зонами регистрации и узкоспектральных зон регистрации, формируемых интерферометром Фабри-Перо [1, 4, 5]. Однако в научно-технической литературе данные вопросы освещены недостаточно.

Целью настоящей статьи является рассмотрение результатов компьютерного моделирования вариантов одномодового сканирования видимого диапазона спектра с регистрацией спектральных изображений трехканальным матричным фотоприемником, имеющим широкие зоны регистрации, соответствующие трем участкам видимого диапазона спектра: 0,4–0,5 мкм – условно синяя (B), 0,5–0,6 мкм – зеленая (G) и 0,6–0,7 мкм – красная (R) области спектра.

Одномодовое сканирование видимого диапазона спектра в ГСС на базе ФПИ с использованием цветного матричного фотоприемника

Для данного варианта сканирования необходимо, чтобы расстояние $\Delta\lambda$ между сканирующей модой и следующей за ней модой было не менее ширины каналов RGB, т. е. соответствовало условию $\Delta\lambda \geq 0,1$ мкм. В этом случае в каждом из каналов в каждый момент времени будет присутствовать сигнал только от одной моды.

Для мод $m=2$, $m=3$ и $m=4$ это условие выполняется. Действительно, минимальное расстояние $\Delta\lambda=0,1$ мкм обеспечивается для моды $m=4$, поскольку

в случае появления моды $m=5$ на $\lambda_{min}=0,4$ мкм мода $m=4$ будет находиться на $\lambda = \frac{5\lambda_{min}}{4} = 0,5$ мкм.

Таким образом, для мод более низких порядков ($m<4$) $\Delta\lambda>0,1$ мкм, а для мод более высоких порядков ($m>4$) $\Delta\lambda<0,1$ мкм.

Ниже более подробно рассматриваются варианты одномодового сканирования с использованием одной из мод $m=2$, $m=3$ или $m=4$.

Вариант сканирования с использованием моды $m=2$

Процесс сканирования иллюстрируется рисунками 6–9, полученными путем компьютерного моделирования коэффициента пропускания ФПИ по формуле Эйри.

Параметры сканирования при этом следующие: минимальная длина волны $\lambda_{min}=0,4$ мкм (начальное положение моды $m=2$), $\lambda_{max}=0,7$ мкм (конечное положение моды $m=2$), воздушные зазоры $d_{c\ min} = \lambda_{min} = 0,4$ мкм, $d_{c\ max} = \frac{2\lambda_{max}}{2} = 0,7$ мкм.

Изображения в канале В, соответствующие сканированию модой 2 синей области спектра 0,4–0,5 мкм, определяются шагами сканирования в диапазоне от $d_{c\ min} = 0,4$ мкм до $d=0,5$ мкм.

Изображения в канале G, соответствующие сканированию модой 2 зеленой области спектра 0,5–0,6 мкм, определяются шагами сканирования в диапазоне от $d=0,5$ мкм до $d=0,6$ мкм.

Изображения в канале R, соответствующие сканированию модой 3 синей области спектра 0,6–0,7 мкм, определяются шагами сканирования в диапазоне от $d=0,6$ мкм до $d_{c\ max} = 0,7$ мкм.

При этом на каждый канал приходится 1/3 часть от общего числа шагов сканирования $n_{max\ 2} = \frac{\lambda_{max}-\lambda_{min}}{\delta d}$ модой $m=2$.

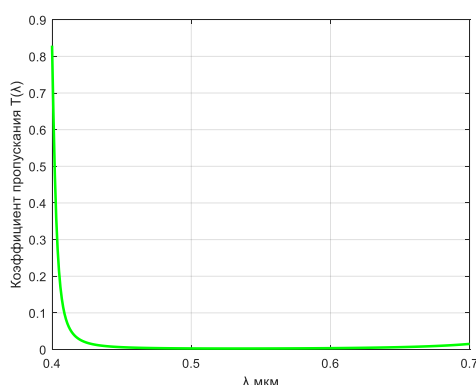


Рисунок 6. Начало сканирования модой $m=2$ синей (0,4–0,5 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала В

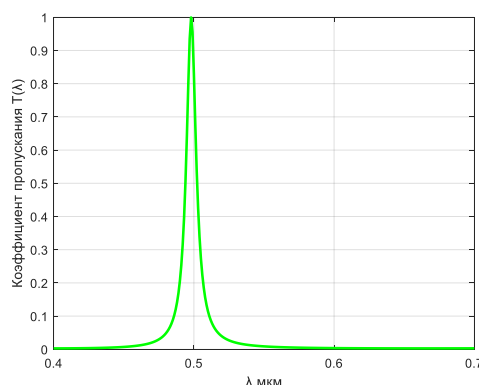


Рисунок 7. Окончание сканирования модой $m=2$ синей (0,4–0,5 мкм) и начало сканирования зеленой (0,5–0,6 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала G

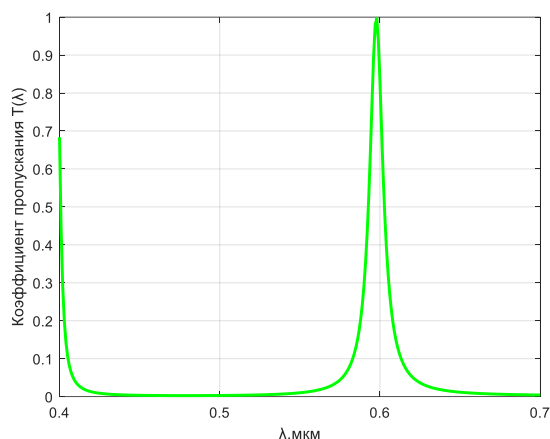


Рисунок 8. Окончание сканирования модой $m=2$ зеленой (0,5–0,6 мкм) и начало сканирования красной (0,6–0,7 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала R

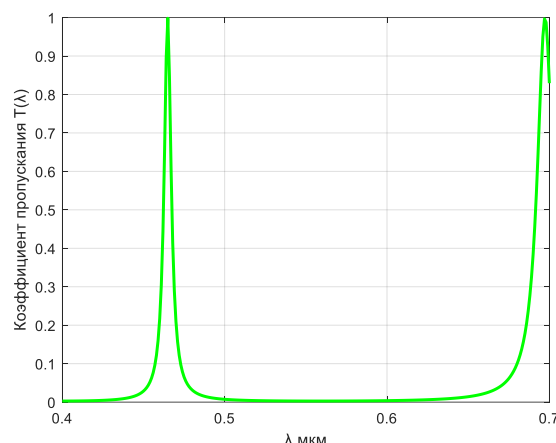


Рисунок 9. Окончание сканирования модой $m=2$ красной (0,6–0,7 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала R

Схема распределения последовательности спектральнональных изображений в диапазоне $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ показана в таблице 3.

Таблица 3. Распределение по каналам RGB последовательности спектральнональных изображений в диапазоне $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ модой $m=2$

Диапазон [λ_{min} , λ_{max}]	B: 0,4–0,5 мкм			G: 0,5–0,6 мкм			R: 0,6–0,7 мкм					
Канал R	-	-	...	-	-	-	...	-	R	R	...	R
Канал G	-	-		-	G	G		G	-	-		-
Канал B	B	B		B	-	-		-	-	-		-
Номер шага сканирования	1	2		$\frac{n_{max2}}{3}$	$\frac{n_{max2}}{3} + 1$	$\frac{n_{max2}}{3} + 2$		$\frac{2n_{max2}}{3}$	$\frac{2n_{max2}}{3} + 1$	$\frac{2n_{max2}}{3} + 2$		n_{max2}

Вариант сканирования с использованием моды $m=3$

Процесс сканирования иллюстрируется рисунками 10–13. Параметры сканирования при этом следующие: минимальная длина волны $\lambda_{min}=0,4$ мкм (начальное положение моды $m=3$), $\lambda_{max}=0,7$ мкм (конечное положение моды $m=3$), воздушные зазоры $d_{cmin} = \frac{3\lambda_{min}}{2} = 0,6$ мкм, $d_{cmax} = \frac{3\lambda_{max}}{2} = 1,05$ мкм.

Изображения в канале B, соответствующие сканированию модой 3 синей области спектра 0,4–0,5 мкм, определяются шагами сканирования в диапазоне от $d_{cmin} = 0,6$ мкм до $d=0,75$ мкм.

Изображения в канале G, соответствующие сканированию модой 3 зеленой области спектра 0,5–0,6 мкм, определяются шагами сканирования в диапазоне от $d=0,75$ мкм до $d=0,9$ мкм.

Изображения в канале R, соответствующие сканированию модой 3 синей области спектра 0,6–0,7 мкм, определяются шагами сканирования в диапазоне от $d=0,9$ мкм до $d_{c\max} = 1,05$ мкм.

При этом общее число шагов сканирования $n_{\max 3}$ модой $m=3$ определится из формулы $n_{\max} = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{\delta d}$, которая для данного конкретного случая соответствует

$$n_{\max 3} = \frac{3(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}{2\delta d}, \text{ что на 50\% больше, чем для случая с модой } m=2.$$

При этом, как и в предыдущем случае с модой $m=2$, для моды $m=3$ на каждый канал приходится 1/3 часть от общего числа шагов сканирования $n_{\max 3}$ модой $m=3$.

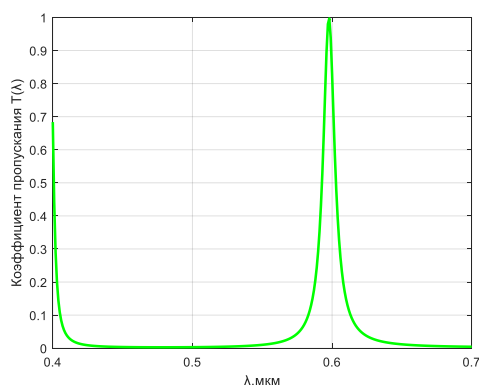


Рисунок 10. Начало сканирования модой $m=3$ синей (0,4–0,5 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала В

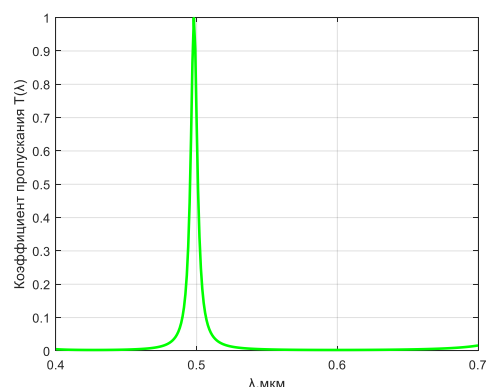


Рисунок 11. Окончание сканирования модой $m=3$ синей (0,4–0,5 мкм) и начало сканирования зеленой (0,5–0,6 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала G

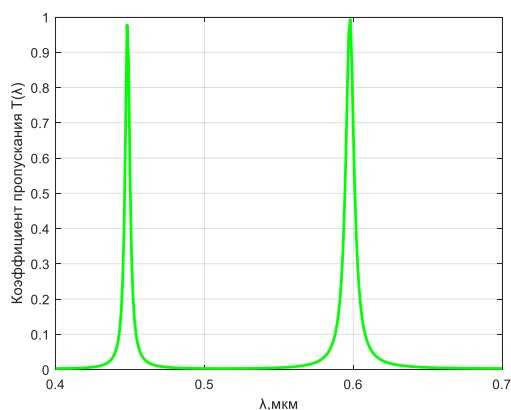


Рисунок 12. Окончание сканирования модой $m=3$ зеленой (0,5–0,6 мкм) и начало сканирования красной (0,6–0,7 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала R

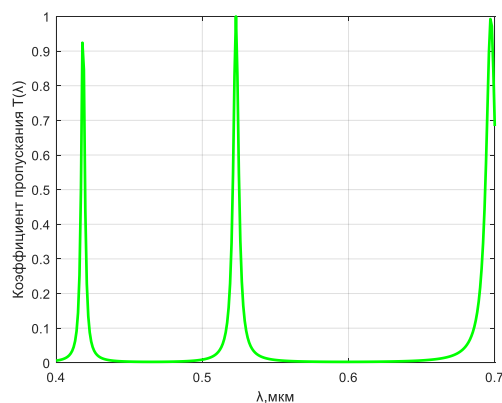


Рисунок 13. Окончание сканирования модой $m=3$ красной (0,6–0,7 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала R

Схема распределения последовательности спектральных изображений в диапазоне $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ при сканировании модой $m=3$ аналогична схеме для случая с модой $m=2$ (таблица 4).

Таблица 4. Распределение по каналам RGB последовательности спектрозональных изображений в диапазоне $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ модой $m=3$

Диапазон $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$	B: 0,4–0,5 мкм			G: 0,5–0,6 мкм			R: 0,6–0,7 мкм		
Канал R	-	-		-	-	-	R	R	R
Канал G	-	-		-	G	G	-	-	-
Канал B	B	B		B	-	-	-	-	-
Номер шага сканирования	1	2	...	$\frac{n_{max3}}{3}$	$\frac{n_{max3}}{3} + 1$	$\frac{n_{max3}}{3} + 2$	$\frac{2n_{max3}}{3}$	$\frac{2n_{max3}}{3} + 1$	$\frac{2n_{max3}}{3} + 2$

По сравнению со сканированием модой 2, вариант сканирования модой 3 отличается более высоким спектральным разрешением (в 1,5 раза), вследствие большего числа шагов сканирования при одном и том же шаге, а также более узкой полосой пропускания.

Вариант сканирования с использованием моды $m=4$

Процесс сканирования иллюстрируется рисунками 14–17. Параметры сканирования при этом следующие: минимальная длина волны $\lambda_{min}=0,4$ мкм (начальное положение моды $m=4$), $\lambda_{max}=0,7$ мкм (конечное положение моды $m=4$), воздушные зазоры $d_{cmin} = \frac{4\lambda_{min}}{2} = 0,8$ мкм, $d_{cmax} = \frac{4\lambda_{max}}{2} = 1,4$ мкм.

Изображения в канале B, соответствующие сканированию модой 2 синей области спектра 0,4–0,5 мкм, определяются шагами сканирования в диапазоне от $d_{cmin} = 0,8$ мкм до $d=1,0$ мкм.

Изображения в канале G, соответствующие сканированию модой 2 зеленой области спектра 0,5–0,6 мкм, определяются шагами сканирования в диапазоне от $d=1,0$ мкм до $d=1,2$ мкм.

Изображения в канале R, соответствующие сканированию модой 3 синей области спектра 0,6–0,7 мкм, определяются шагами сканирования в диапазоне от $d=1,2$ мкм до $d_{cmax} = 1,4$ мкм.

При этом общее число шагов сканирования n_{max4} модой $m=4$ определится из формулы $n_{max} = \frac{d_{max}-d_{min}}{\delta d}$, которая для данного конкретного случая соответствует

$$n_{max4} = \frac{2(\lambda_{max}-\lambda_{min})}{\delta d}, \text{ что в 2 раза больше, чем для случая с модой } m=2.$$

При этом, как и в предыдущих случаях с модами $m=2$ и $m=3$ на каждый канал приходится 1/3 часть от общего числа шагов сканирования n_{max4} модой $m=4$.

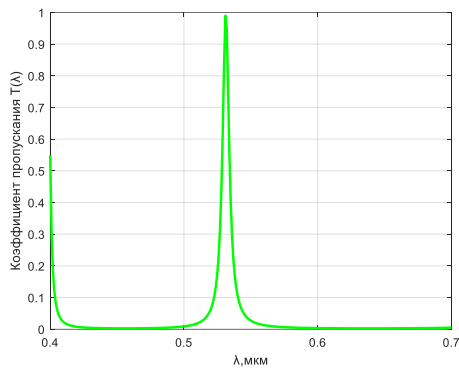


Рисунок 14. Начало сканирования модой 4 синей (0,4–0,5 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала В

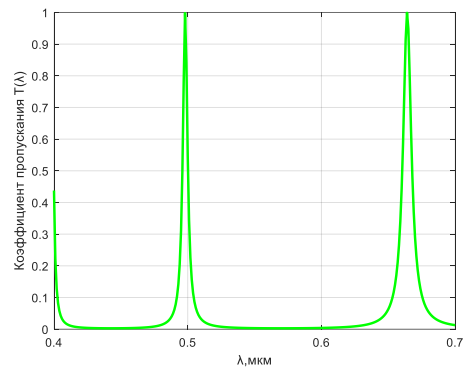


Рисунок 15. Окончание сканирования модой 4 синей (0,4–0,5 мкм) и начало сканирования зеленой (0,5–0,6 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала G

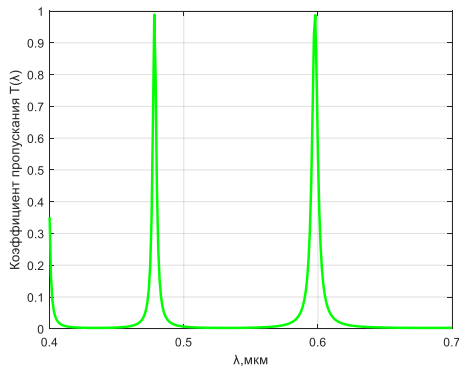


Рисунок 16. Окончание сканирования модой 4 зеленой (0,5–0,6 мкм) в комбинации со встроенным светофильтром канала G и начало сканирования красной (0,6–0,7 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала R

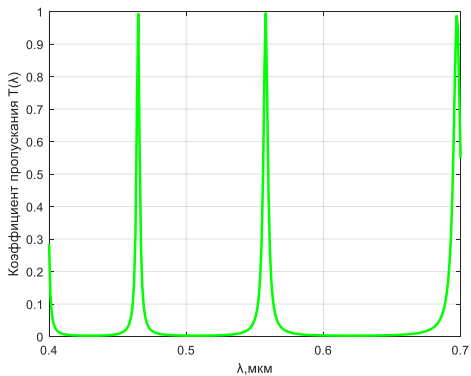


Рисунок 17. Окончание сканирования модой 4 красной (0,6–0,7 мкм) области спектра в комбинации со встроенным светофильтром канала R

Схема распределения последовательности спектральнональных изображений в диапазоне $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ при сканировании модой $m=4$ аналогична схеме для случаев с модами $m=2$ и $m=3$ (таблица 5).

Таблица 5. Распределение по каналам RGB последовательности спектральнональных изображений в диапазоне $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ модой $m=4$

Диапазон [λ_{min} , λ_{max}]	B: 0,4–0,5 мкм			G: 0,5–0,6 мкм			R: 0,6–0,7 мкм					
Канал R	-	-	...	-	-	-	...	-	R	R	...	R
Канал G	-	-		-	G	G		G	-	-		-
Канал B	B	B		B	-	-		-	-	-		-
Номер шага сканирования	1	2	...	$\frac{n_{max4}}{3}$	$\frac{n_{max4}}{3} + 1$	$\frac{n_{max4}}{3} + 2$	...	$\frac{2n_{max4}}{3}$	$\frac{2n_{max4}}{3} + 1$	$\frac{2n_{max4}}{3} + 2$	...	n_{max4}

Вариант сканирования модой 4 по сравнению со сканированием модой 2 отличается в 2 раза более высоким спектральным разрешением, а по сравнению со сканированием модой 3 – в 1,3 раза вследствие большего числа шагов сканирования при одном и том же шаге. Кроме этого, вариант сканирования модой 4 отличается более узкой полосой пропускания моды 4 по отношению к моде 2 и 3 (рисунок 18).

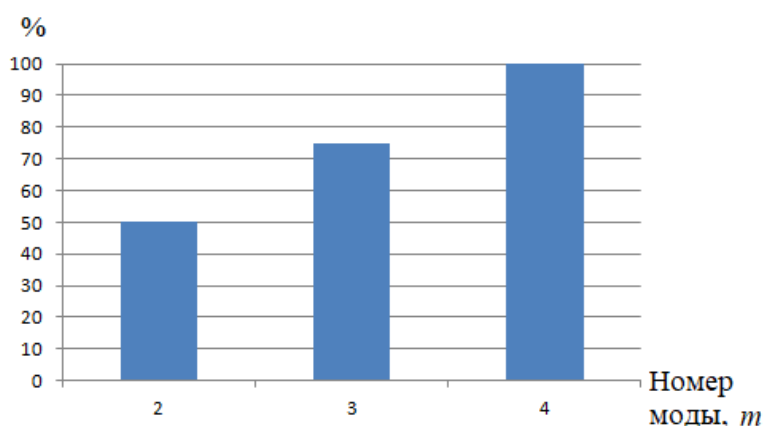


Рисунок 18. Сравнительная диаграмма для относительного числа спектральных каналов при сканировании модами $m=2, 3$ и 4

Заключение

Результаты компьютерного моделирования показывают, что при использовании трехканального матричного фотоприемника при равномерном разделении видимого диапазона спектра на три части (каналы RGB) обеспечивается возможность одномодового сканирования данного диапазона модами с порядками интерференции $1 < m < 5$.

Условие того, что расстояние Δl между соседними модами было бы не менее ширины каналов RGB, накладывает ограничение на использование порядков интерференции.

Использование при сканировании мод с более высоким порядком обеспечивает увеличение числа спектральных каналов при фиксированном шаге сканирования, а также уменьшение ширины полосы пропускания и, соответственно, спектрального разрешения.

Список литературы

1. Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Кочкарев Д. В., Никулин Д. М., Шергин С. Л. Гиперспектральные видеоанализаторы на основе электроуправляемых интерферометров Фабри-Перо // Сборник материалов Международной научной конференции «СибОптика-2015» (Интерэкспо ГЕО-Сибирь), 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск, в 3 т. Т. 1. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. 3–11.

2. Zucco M., Pisani M., Caricato V., Egidi A. A hyperspectral imager based on a Fabry-Perot interferometer with dielectric mirrors // *Optics Express*. 2014. 22 (2). 1824–1834. DOI: 10.1364/OE.22.001824
3. Nissim R. R., Learmonth T., Hsu M., Finkelstein H. Patent US N 10,323,985 B2 from CPC G01J 3/45; G01J 3/0297; G01J 9/0246; G02B 26/001; G02B 26/29358; G02B 5/284; G06K 2009/00644; G06K 2009/4657; G06T 2207/1–36; G01B 9/02072; G01B 9/02074; USP 336/453. Signal processing for tunable Fabry–Perot interferometer based hyperspectral imaging: No. 62/419,816: appl. 09.11.2016: publ. 18.06.2019 / applicant TruTag Technologies, Inc., Kapolei, HI (USA). 14 p.
4. Хорохоров А. М., Ивашкина Е. С., Гурылева А. В. Патент № 2801836 С1 Российская Федерация, МПК G01J 3/02, G01N 21/25. Быстродействующий гиперспектрометр с управляемым спектральным фильтром: № 2022131265: заявл. 30.11.2022: опублик. 16.08.2023 / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана».
5. Гурылева А. В., Хорохоров А. М., Ширанков А. Ф., Введенский В. В. Патент № 2716454 С1 Российская Федерация, МПК G01J 3/02, G01J 3/28, G01J 3/51. Гиперспектрометр с повышенной спектральной разрешающей способностью: № 2019110363: заявл. 08.04.2019: опублик. 11.03.2020.
6. Гареев В. М., Гареев М. В., Лебединский Н. И., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Гиперспектральная система видимого диапазона на базе интерферометра Фабри–Перо // *Вестник НовГУ*. 2022. 3 (128). 78–83. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83
7. Серебряков Д. А., Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П. Особенности формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри–Перо // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2023. 1. 128–132.

References

1. Chesnokov V. V., Chesnokov D. V., Kochkarev D. V., Nikulin D. M., Shergin S. L. The hyperspectral video analyzer on base of electric driven Fabry-Perot interferometer // *Proceedings of the International Scientific Conference "SibOptics-2015" (Interexpo GEO-Siberia)*, April 13–25, 2015, Novosibirsk, in 3 volumes. Vol. 1. Novosibirsk: SGUGiT, 2015. 3–11. (In Russian).
2. Zucco M., Pisani M., Caricato V., Egidi A. A hyperspectral imager based on a Fabry-Perot interferometer with dielectric mirrors // *Optics Express*. 2014. 22 (2). 1824–1834. DOI: 10.1364/OE.22.001824
3. Nissim R. R., Learmonth T., Hsu M., Finkelstein H. Patent US N 10,323,985 B2 from CPC G01J 3/45; G01J 3/0297; G01J 9/0246; G02B 26/001; G02B 26/29358; G02B 5/284; G06K 2009/00644; G06K 2009/4657; G06T 2207/1–36; G01B 9/02072; G01B 9/02074; USP 336/453. Signal processing for tunable Fabry–Perot interferometer based hyperspectral imaging: No. 62/419,816: appl. 09.11.2016: publ. 18.06.2019 / applicant TruTag Technologies, Inc., Kapolei, HI (USA). 14 p.
4. Khorokhorov A. M., Ivashkina E. S., Guryleva A. V. Patent No. 2801836 C1 Russian Federation, IPC G01J 3/02, G01N 21/25. Fast hyperspectrometer with controlled spectral filter: No. 2022131265: appl. 11.30.2022: publ. 08.16.2023 / applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bauman Moscow State Technical University". (In Russian).

5. Guryleva A. V., Khorokhorov A. M., Shirankov A. F., Vvedenskij V. V. Patent No. 2716454 C1 Russian Federation, IPC G01J 3/02, G01J 3/28, G01J 3/51. Hyperspectrometer with higher spectral resolution: No. 2019110363: appl. 04.08.2019: publ. 03.11.2020. (In Russian).

6. Gareev V. M., Gareev M. V., Lebedinsky N. I., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Hyperspectral visible range system based on the Fabry-Pérot interferometer // Vestnik NovSU. 2022. 3 (128). 78–83. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83 (In Russian).

7. Serebrjakov D. A., Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P. Features of image formation in a hyperspectral system based on the Fabry–Perot interferometer // Radio electronics issues. Series: Television Technology. 2023. 1. 128–132. (In Russian).

Информация об авторах

Гареев Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Техническое зрение, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), 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, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-3177-2040, Nikolai.Kornishev@novsu.ru

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