

## РАДИОФИЗИКА

УДК 681.787.6:621.383

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).379-399

Поступила в редакцию / Received 19.07.2025

ГРНТИ 29.31.29+44.41.35

Специальность ВАК 1.3.4.; 2.2.13.

Принята к публикации / Accepted 16.09.2025

*Научная статья*

### КОМПЕНСАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

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 черно-белого матричного фотоприемника, регистрирующего сигналы изображений в процессе сканирования заданного спектрального диапазона. Описываются методы формирования изображений, основанные на предварительном сканировании заданного диапазона спектра, запоминании получаемых изображений и их вычитании из изображений, получаемых при текущем сканировании. Производится оценка выигрыша, заключающегося в расширении диапазона спектрального сканирования в одномодовом режиме. Детально рассматриваются параметры сканирования для нескольких вариантов реализации процесса компенсации с использованием различных порядков интерференции и обсуждаются результаты их компьютерного моделирования, а также даются рекомендации по применению. В статье подробно рассматриваются параметры сканирования спектрального диапазона. Приводятся соответствующие формулы, таблицы и иллюстрации, показывающие последовательность получения изображений для компенсации дополнительных мод, появляющихся в процессе сканирования.

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

**Для цитирования:** Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Компенсационные методы формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри-Перо // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 379–399. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).379-399

*Research Article*

### COMPENSATORY IMAGING METHODS IN A HYPERSPECTRAL SYSTEM BASED ON THE FABRY-PEROT INTERFEROMETER

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 a black-and-white matrix sensor that registers image signals during scanning of a given spectral range. Image generation methods based on preliminary scanning of a given range of the spectrum, storing the resulting images and subtracting these images from the images obtained during the current scan are described. The gain is estimated, which consists in expanding the range of spectral scanning in single-mode mode. The scanning parameters for several variants of the compensation process using different interference orders are considered in detail, and the results of their computer simulation are discussed, as well as recommendations for their application. The article discusses in detail the parameters of scanning the spectral range.

The corresponding formulas, tables, and illustrations are provided, showing the sequence of image acquisition to compensate for additional modes that appear during the scanning process.

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

**For citation:** Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Compensatory imaging methods in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 379–399. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).379-399

## Введение

Гиперспектральные системы (ГСС) со спектральным сканированием на основе интерферометра Фабри-Перо (ФПИ) обладают рядом достоинств, в частности малыми габаритами и удобством выбора узких зон регистрации путем электрического управления размером воздушного зазора при помощи пьезоактюаторов [1–2].

Случай, когда при каждом шаге сканировании осуществляется фиксация изображения, соответствующего единственной узкой зоне регистрации, формируемой ФПИ (одномодовое сканирование), является наиболее простым для реализации [3–5]. Кроме простоты данный режим работы ГСС на ФПИ обеспечивает более высокую контрастную чувствительность по сравнению с многомодовым сканированием с фиксацией изображений от соответствующих мод в соответствующих каналах многосигнального фотоприемника (в частном случае цветного RGB фотоприемника), поскольку достичь потенциального так называемого выигрыша Фелджета [6, 7], который обеспечивал бы одинаковую контрастную чувствительность при одно- и многомодовом сканировании, практически не удастся из-за изменения расстояния между модами в процессе сканирования.

Диапазон сканирования  $\Delta\lambda = [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$  в одномодовом режиме работы ограничивается расстоянием между смежными модами, соответствующими порядкам интерференции  $m$  и  $m+1$ .

Увеличить диапазон сканирования можно, в частности, за счет комбинирования ФПИ и светофильтров с широкими зонами регистрации, отсекающими участки диапазона с дополнительными модами высших порядков интерференции [2].

Альтернативными методами, позволяющими расширить диапазон сканирования, являются рассматриваемые в настоящей статье компенсационные методы [8], заключающиеся в предварительном его сканировании и запоминании изображений от дополнительных (компенсируемых) мод, которые при информативном сканировании на основной (сканирующей) моде вычитаются из регистрируемых изображений.

Целью настоящей статьи является рассмотрение результатов компьютерного моделирования методов одномодового сканирования, основанного на компенсации

сигналов изображений от дополнительных мод, появляющихся при превышении спектрального диапазона расстояния между соседними модами.

### Увеличение диапазона сканирования в одномодовом режиме с компенсацией сигнала от высших порядков интерференции

Как было отмечено ранее, базовые диапазоны сканирования для отдельных мод строго ограничены. Количественная оценка этого ограничения для различных порядков интерференции  $m$  приведена в таблице 1, где представлены верхняя граница  $\lambda_{max}$  и диапазон сканирования  $\Delta\lambda$  для одномодового режима.

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

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

Как следует из данных таблицы, диапазон сканирования  $\Delta\lambda$  сужается с ростом порядка интерференции  $m$ . Увеличение диапазона сканирования в компенсационных методах определяется расстоянием между компенсируемой модой и следующей после нее порядком интерференции. Так, например, при основной моде  $m_c=1$  увеличение диапазона сканирования при компенсации сигнала от следующей после нее моды  $m_k=2$  увеличивается на расстояние между модами  $m=2$  и  $m=3$ , что соответствует расстоянию  $1,5\lambda_{min}$ .

Возможна компенсация с использованием нескольких компенсируемых мод, что увеличивает диапазон сканирования. При этом число предварительных сканирований определяется числом компенсируемых мод. Так, например, при основной моде  $m_c=1$  увеличение диапазона сканирования при компенсации сигнала от следующих после нее мод  $m_k=2$  и  $m_k=3$  составит  $1,5\lambda_{min} + 1,33(3)\lambda_{min} + 1,25\lambda_{min}$ , поскольку при компенсации моды  $m=2$  автоматически происходит компенсация моды  $m_k=4$  и всех последующих четных мод.

Параметры сканирования определяются следующим образом. Задается нижняя граница диапазона сканирования  $\lambda_{min}$ , номер сканирующей моды  $m_c$  и номера компенсируемых мод  $m_k$ . Окончание сканирования определится при появлении на нижней границе диапазона сканирования  $\lambda_{min}$  моды с номером  $m_{max}=m_{kmax}+1$ , при этом верхняя граница диапазона сканирования будет соответствовать  $\lambda_{max} = \frac{m_{max}\lambda_{min}}{m_c}$ .

Воздушные зазоры для сканирующей моды, соответствующие диапазону сканирования  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ , определяются выражениями  $d_{c\ min} = \frac{m_c \lambda_{min}}{2}$  и  $d_{c\ max} = \frac{m_{max} \lambda_{min}}{2}$ .

Воздушные зазоры для компенсируемых мод, соответствующие диапазону сканирования  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ , определяются выражениями  $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{m_k}$  и  $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{m_k}$ .

Шаг сканирования для компенсируемых мод по отношению к шагу сканирующих мод определяется из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{k}$ , где  $k = \frac{d_{c\ min}}{d_{k\ min}}$ .

Формирование спектральных изображений осуществляется следующим образом, предварительно сканируется диапазон  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$  путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне  $[d_{k\ min}, d_{k\ max}]$  с шагом  $\delta d_k$ , что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания  $T_k(\lambda)$ . Получаемые изображения  $U_k(\lambda)$  запоминаются в блоке памяти. В случае компенсации с использованием нескольких компенсируемых мод выполняются дополнительные сканирования с соответствующими воздушными зазорами и шагом. Получаемые изображения  $U_k(\lambda)$  также запоминаются в блоке памяти.

Затем сканируется диапазон  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$  путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне  $[d_{c\ min}, d_{c\ max}]$  с шагом  $\delta d_c$ , что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания  $T_c(\lambda)$ . Из получаемых при этом изображений  $U_c(\lambda)$  вычитаются полученные на соответствующих шагах сканирования изображения, считываемые с блока памяти, и формируются выходные изображения  $U_{вых}(\lambda) = U_c(\lambda) - U_k(\lambda)$ , в которых скомпенсирован сигнал от мод высших порядков интерференции, образующихся в процессе сканирования в пределах диапазона  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ .

Ниже рассматриваются результаты компьютерного моделирования частных случаев сканирования спектрального диапазона в одномодовом режиме с компенсацией сигнала от высших порядков интерференции. Для вычисления коэффициентов пропускания использовалась формула Эйри:  $T(\lambda) = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2 \cdot R \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(\theta)}{\lambda}\right)}$  [9] при значениях угла падения лучистого потока  $\theta=5^\circ$  и коэффициент отражения зеркальной поверхности  $R=0,9$ .

### **Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=1$ с компенсацией сигнала от моды $m=2$**

В данном случае сканирующей модой является мода  $m=1$ . Таким образом, максимум моды  $m=1$  в начале сканирования должен соответствовать его нижней границе  $\lambda_{min}$ . Запишем это условие как  $\lambda_{min\ 1} = \lambda_{min}$  (рисунок 1). При этом положение максимума компенсируемой моды  $m=2$  определится исходя из того, что  $\lambda_{min\ 2} = \frac{\lambda_{min\ 1}}{2}$ .

Соответствующий минимальный зазор  $d_{c\ min}$  для сканирующей моды  $m=1$  определяется выражением  $d_{c\ min} = \frac{\lambda_{min}}{2}$ . Соответствующий минимальный зазор  $d_{k\ min}$  для компенсируемой моды  $m=2$  равен  $d_{k\ min} = \frac{\lambda_{min2}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{4} = \frac{d_{c\ min}}{2}$ .

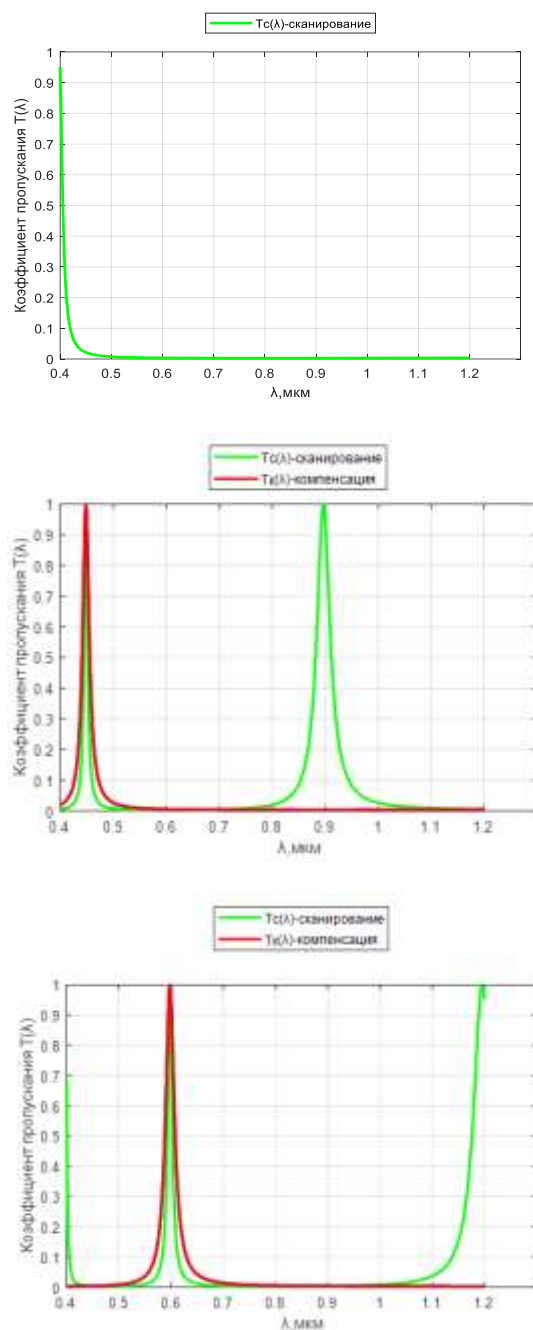


Рисунок 1. Иллюстрация сканирования видимой области спектра модой  $m=1$  (график  $T_c(\lambda)$ ) в диапазоне от  $\lambda_{min}=400$  нм до  $\lambda_{max}=1200$  нм при компенсации сигнала от моды  $m=2$  (график  $T_k(\lambda)$ ). Графики сверху соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования

Окончание сканирования в данном случае при компенсации моды  $m=2$  будет соответствовать появлению на нижней границе  $\lambda_{min}$  максимума следующей моды, т. е.  $m=3$ . Запишем это условие как  $\lambda_{max3}=\lambda_{min}$ . При этом положение максимума моды  $m=1$  будет соответствовать длине волны  $\lambda_{max1}=3\lambda_{max3}=3\lambda_{min}$ .

Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования  $\lambda_{max} = \lambda_{max1} = 3\lambda_{min}$ , а положение максимума компенсируемой моды  $m=2$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{max3} = \frac{\lambda_{max1}}{3}$  и  $\lambda_{max2} = \frac{\lambda_{max1}}{2}$ , то  $\lambda_{max2} = \frac{3\lambda_{max3}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{2}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{cmax}$  для сканирующей моды  $m=1$  определяется выражением  $d_{cmax} = \frac{\lambda_{max1}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{2}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{kmax}$  для компенсируемой моды  $m=2$  равен  $d_{kmax} = \frac{\lambda_{max2}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{4} = \frac{d_{cmax}}{2}$ .

Параметры сканирования сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=1$  с компенсацией сигнала от моды  $m=2$

Параметр	$d_{cmin}$	$d_{cmax}$	$d_{kmin}$	$d_{kmax}$	$\delta d_c$	$\delta d_k$	$\lambda_{min}$	$\lambda_{max1}$
Значение	$\frac{\lambda_{min}}{2}$	$\frac{3\lambda_{min}}{2}$	$\frac{d_{cmin}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{4}$	$\frac{d_{cmax}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{4}$	$\delta d_c$	$\frac{\delta d_c}{2}$	$\lambda_{min}$	$3\lambda_{min}$

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=1$  с компенсацией сигнала от моды  $m=2$  определяется расстоянием между нечетными порядками интерференции  $m=1$  и  $m=3$ . Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{2}$ , поскольку  $d_{kmin} = \frac{d_{cmin}}{2}$  и  $d_{kmax} = \frac{d_{cmax}}{2}$ .

### **Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=1$ с компенсацией сигнала от четных мод и моды $m=3$**

В отличие от случая, рассмотренного выше, окончание сканирования модой  $m=1$  при компенсации моды  $m=2$  и дополнительной компенсации моды  $m=3$  будет соответствовать появлению на нижней границе  $\lambda_{min}$  моды  $m=5$ , поскольку при компенсации моды  $m=2$  автоматически компенсируются все четные моды (рисунок 2).

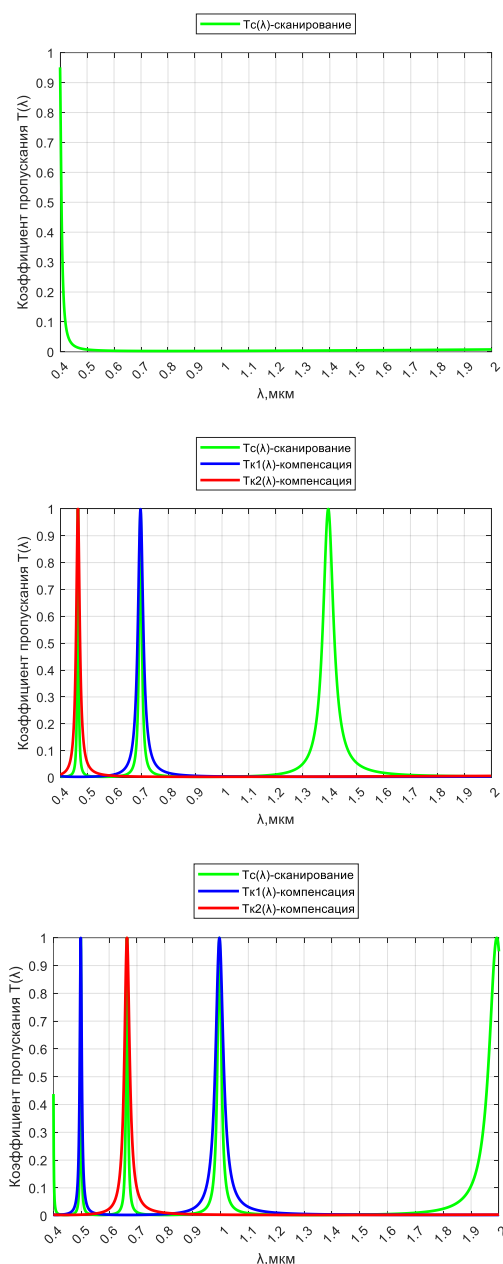


Рисунок 2. Иллюстрация сканирования видимой области спектра модой  $m=1$  (график  $T_c(\lambda)$ ) в диапазоне от  $\lambda_{\min}=400$  нм до  $\lambda_{\max}=2000$  нм (график  $T_c(\lambda)$ ) при компенсации сигнала от моды  $m=2$  и  $m=4$  (график  $T_k(\lambda)$ ), а также от моды  $m=3$  (график  $T_{k2}(\lambda)$ ). Графики сверху соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования

Запишем это условие как  $\lambda_{\max 5} = \lambda_{\min}$ . При этом положение максимума моды  $m=1$  будет соответствовать длине волны  $\lambda_{\max 1} = 5\lambda_{\max 5} = 5\lambda_{\min}$ . Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования  $\lambda_{\max} = \lambda_{\max 1} = 5\lambda_{\min}$ . Параметры сканирующей моды и компенсирующей моды  $m=2$  остаются без изменения:  $d_{c \min} = \frac{\lambda_{\min}}{2}$  и  $d_{k \min} = \frac{d_{c \min}}{2}$ .

В результате положение максимума компенсируемой моды  $m=2$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{\max 5} = \frac{\lambda_{\max 1}}{5}$ , а  $\lambda_{\max 2} = \frac{\lambda_{\max 1}}{2}$ , то  $\lambda_{\max 2} = \frac{5\lambda_{\max 5}}{2} = \frac{5\lambda_{\min}}{2}$ , а для автоматически компенсируемой моды  $m=4$ , соответственно,  $\lambda_{\max 4} = \frac{5\lambda_{\min}}{4}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{c \max}$  для сканирующей моды  $m=1$  определится выражением  $d_{c \max} = \frac{\lambda_{\max 1}}{2} = \frac{5\lambda_{\min}}{2}$ , а соответствующий максимальный зазор  $d_{k \max}$  для компенсируемой моды  $m=2$  равен  $d_{k \max} = \frac{d_{c \max}}{2}$ .

Поскольку  $\lambda_{\min 3} = \frac{\lambda_{\min 1}}{3} = \frac{\lambda_{\min}}{3}$ , то соответствующий минимальный зазор  $d_{k \min}$  для дополнительно компенсируемой моды  $m=3$  равен  $d_{k \min} = \frac{\lambda_{\min 3}}{2} = \frac{\lambda_{\min}}{6} = \frac{d_{c \min}}{3}$ .

Поскольку  $\lambda_{\max 3} = \frac{\lambda_{\max 1}}{3} = \frac{5\lambda_{\min}}{3}$ , то соответствующий максимальный зазор  $d_{k \max}$  для дополнительно компенсируемой моды  $m=3$  равен  $d_{k \max} = \frac{\lambda_{\max 3}}{2} = \frac{5\lambda_{\min}}{6} = \frac{d_{c \max}}{3}$ .

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=1$  с компенсацией сигнала от моды  $m=2$  и  $m=3$  определяется расстоянием между нечетными порядками интерференции  $m=1$  и  $m=5$ .

Шаг сканирования для компенсируемой моды  $m=2$  выбирается исходя из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{2}$ , поскольку  $d_{k \min} = \frac{d_{c \min}}{2}$  и  $d_{k \max} = \frac{d_{c \max}}{2}$ , а для компенсируемой моды  $m=3$  исходя из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{3}$ , поскольку  $d_{k \min} = \frac{d_{c \min}}{3}$  и  $d_{k \max} = \frac{d_{c \max}}{3}$ ,

Параметры сканирования сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=1$  для дополнительной компенсации сигнала от моды  $m=3$

Параметр	$d_{c \min}$	$d_{c \max}$	$d_{k \min}$	$d_{k \max}$	$\delta d_c$	$\delta d_k$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max 1}$
Значение	$\frac{\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{5\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{d_{c \min}}{3} = \frac{\lambda_{\min}}{6}$	$\frac{d_{c \max}}{3} = \frac{5\lambda_{\min}}{6}$	$\delta d_c$	$\frac{\delta d_c}{3}$	$\lambda_{\min}$	$5\lambda_{\min}$

### **Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=2$ с компенсацией сигнала от моды $m=3$**

В данном случае сканирующей модой является мода  $m=2$ . Таким образом, максимум моды  $m=2$  в начале сканирования должен соответствовать его нижней границе  $\lambda_{\min}$ . Запишем это условие, как  $\lambda_{\min 2} = \lambda_{\min}$  (рисунок 3).



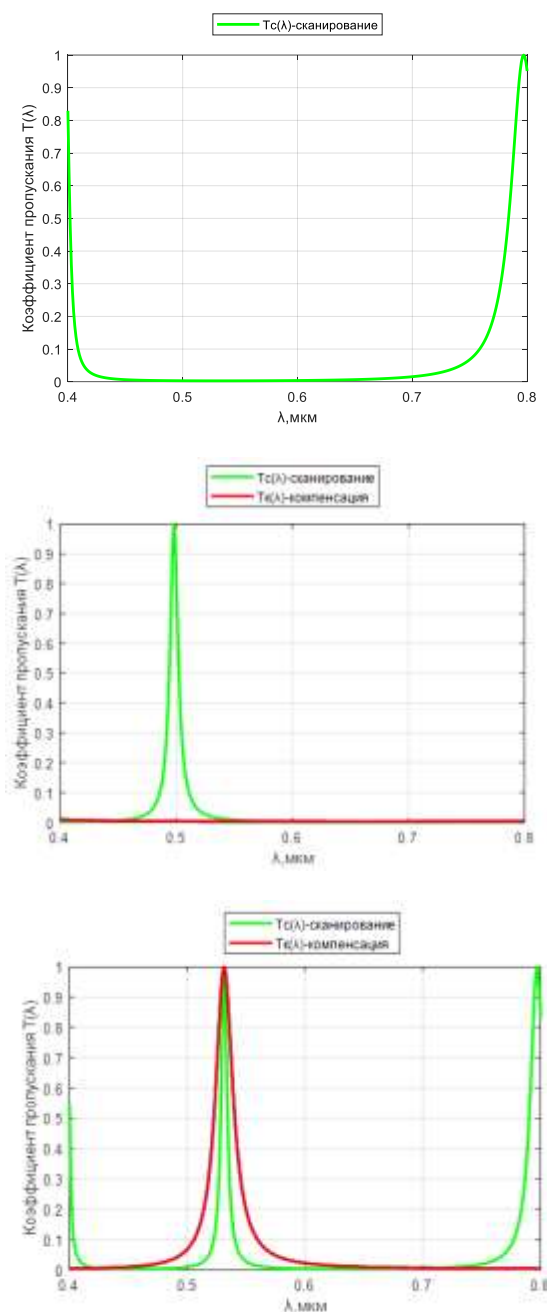


Рисунок 3. Иллюстрация сканирования видимой области спектра модой  $m=2$  (график  $T_c(\lambda)$ ) в диапазоне от  $\lambda_{min}=400$  нм до  $\lambda_{max}=800$  нм при компенсации сигнала от моды  $m=2$  (график  $T_k(\lambda)$ ). Графики сверху соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования

При этом положение максимума моды  $m=1$  будет соответствовать  $\lambda_{min\ 1}=2\lambda_{min}$ , а положение максимума компенсируемой моды  $m=3$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{min\ 3} = \frac{\lambda_{min\ 1}}{3}$ , то  $\lambda_{min\ 3} = \frac{2\lambda_{min}}{3}$ .

Соответствующий минимальный зазор  $d_{c \min}$  для сканирующей моды  $m=2$  определяется выражением  $d_{c \min} = \frac{\lambda_{\min 1}}{2} = \lambda_{\min}$ . Соответствующий минимальный зазор  $d_{k \min}$  для компенсируемой моды  $m=3$  равен  $d_{k \min} = \frac{\lambda_{\min 3}}{2} = \frac{\lambda_{\min}}{3} = \frac{d_{c \min}}{3}$ .

Окончание сканирования в данном случае при компенсации моды  $m=3$  будет соответствовать появлению на нижней границе  $\lambda_{\min}$  моды  $m=4$ .

Запишем это условие как  $\lambda_{\max 4} = \lambda_{\min}$ . При этом положение максимума моды  $m=1$  будет соответствовать длине волны  $\lambda_{\max 1} = 4\lambda_{\min}$ , положение максимума сканирующей моды  $m=2$  определится исходя из того, что  $\lambda_{\max 2} = \frac{\lambda_{\max 1}}{2}$ , а положение максимума сканирующей моды  $m=3$  определится исходя из того, что  $\lambda_{\max 3} = \frac{\lambda_{\max 1}}{3}$ .

Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования  $\lambda_{\max} = \lambda_{\max 2} = 2\lambda_{\min}$ . При этом предполагается предварительное выделение широкой зоны регистрации, соответствующей диапазону сканирования  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ . Соответствующий максимальный зазор  $d_{c \max}$  для сканирующей моды  $m=2$  определяется выражением  $d_{c \max} = \frac{\lambda_{\max 1}}{2} = 2\lambda_{\min}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{k \max}$  для компенсируемой моды  $m=3$  равен  $d_{k \max} = \frac{\lambda_{\max 3}}{2} = \frac{4\lambda_{\min}}{3} = \frac{d_{c \max}}{3}$ .

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=2$  с компенсацией сигнала от моды  $m=3$  определяется расстоянием между четными порядками интерференции  $m=2$  и  $m=4$ .

Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{3}$ , поскольку  $d_{k \min} = \frac{d_{c \min}}{3}$  и  $d_{k \max} = \frac{d_{c \max}}{3}$ .

Параметры сканирования сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=2$  с компенсацией сигнала от моды  $m=3$

Параметр	$d_{c \min}$	$d_{c \max}$	$d_{k \min}$	$d_{k \max}$	$\delta d_c$	$\delta d_k$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max 1}$
Значение	$\lambda_{\min}$	$2\lambda_{\min}$	$\frac{d_{c \min}}{3} = \frac{\lambda_{\min}}{3}$	$\frac{d_{c \max}}{3} = \frac{4\lambda_{\min}}{3}$	$\delta d_c$	$\frac{\delta d_c}{3}$	$\lambda_{\min}$	$2\lambda_{\min}$

Как видно из рисунка 3, в начале сканирования модой  $m=2$  присутствует сигнал от первой моды  $m=1$ , которая не компенсируется. Таким образом, одномодовый режим при сканировании модой  $m=2$  выполняется в диапазоне от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda < \lambda_{\max}$ . В данном примере максимальный диапазон для одномодового режима составит от  $\lambda_{\min} = 400$  нм до  $\lambda_{\max} \approx 750$  нм.

### Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=2$ с компенсацией сигнала от моды $m=3$ и $m=4$

В отличие от случая, рассмотренного выше, окончание сканирования модой  $m=2$  при компенсации моды  $m=3$  и дополнительной компенсации моды  $m=4$  будет соответствовать появлению на нижней границе  $\lambda_{min}$  моды  $m=5$  (рисунок 4).

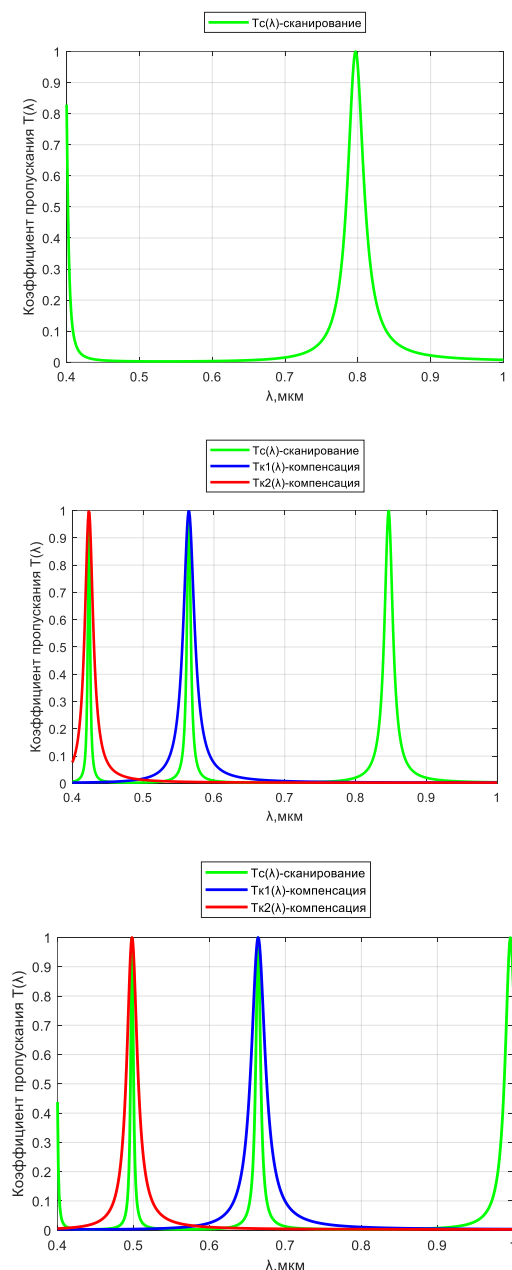


Рисунок 4. Иллюстрация сканирования видимой области спектра модой  $m=2$  (график  $T_c(\lambda)$ ) в диапазоне от  $\lambda_{min}=400$  нм до  $\lambda_{max}=1000$  нм при компенсации сигнала от четных мод  $m=2$  и  $m=4$  (график  $T_{k1}(\lambda)$ ), а также от моды  $m=3$  (график  $T_{k2}(\lambda)$ ). Графики вверх соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования.

Запишем это условие как  $\lambda_{max\ 5} = \lambda_{min}$ . При этом положение максимума моды  $m=1$  будет соответствовать длине волны  $\lambda_{max\ 1} = 5\lambda_{max\ 5} = 5\lambda_{min}$ , а положение максимума моды  $m=2$  будет соответствовать длине волны  $\lambda_{max\ 2} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$ .

Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования  $\lambda_{max} = \lambda_{max\ 2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$ . Параметры сканирующей и компенсируемой моды  $m=3$  остаются без изменения:  $d_{c\ min} = \lambda_{min}$  и  $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{3}$ .

В результате положение максимума компенсируемой моды  $m=3$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{max\ 5} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{5}$ , а  $\lambda_{max\ 3} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{3}$ , то  $\lambda_{max\ 3} = \frac{5\lambda_{max\ 5}}{3} = \frac{5\lambda_{min}}{3}$ , а для компенсируемой моды  $m=4$ , соответственно,  $\lambda_{max\ 4} = \frac{5\lambda_{min}}{4}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{c\ max}$  для сканирующей моды  $m=2$  определится выражением  $d_{c\ max} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{k\ max}$  для компенсируемой моды  $m=3$  равен  $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{3}$ .

Поскольку  $\lambda_{min\ 4} = \frac{\lambda_{min\ 1}}{4} = \frac{\lambda_{min}}{2}$ , то соответствующий минимальный зазор  $d_{k\ min}$  для дополнительно компенсируемой моды  $m=4$  равен  $d_{k\ min} = \frac{\lambda_{min\ 4}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{4} = \frac{d_{c\ min}}{4}$ .

Поскольку  $\lambda_{max\ 4} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{4} = \frac{5\lambda_{min}}{4}$ , то соответствующий максимальный зазор  $d_{k\ max}$  для дополнительно компенсируемой моды  $m=4$  равен  $d_{k\ max} = \frac{\lambda_{max\ 4}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{8} = \frac{d_{c\ max}}{4}$ .

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=2$  с компенсацией сигнала от моды  $m=3$  и  $m=4$  определяется расстоянием между порядками интерференции  $m=2$  и  $m=5$ .

Шаг сканирования для компенсируемой моды  $m=3$  выбирается исходя из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{3}$ , поскольку  $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{3}$  и  $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{3}$ , а для компенсируемой моды  $m=4$  исходя из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{4}$ , поскольку  $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{4}$  и  $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{4}$ .

Параметры сканирования сведены в таблицу 5.

Таблица 5. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=2$  для дополнительной компенсации сигнала от моды  $m=4$

Параметр	$d_{c\ min}$	$d_{c\ max}$	$d_{k\ min}$	$d_{k\ max}$	$\delta d_c$	$\delta d_k$	$\lambda_{min}$	$\lambda_{max\ 1}$
Значение	$\lambda_{min}$	$\frac{5\lambda_{min}}{2}$	$\frac{d_{c\ min}}{4} = \frac{\lambda_{min}}{4}$	$\frac{d_{c\ max}}{4} = \frac{5\lambda_{min}}{8}$	$\delta d_c$	$\frac{\delta d_c}{4}$	$\lambda_{min}$	$\frac{5\lambda_{min}}{2}$

Как видно из рисунка 4, в начале сканирования модой  $m=2$  присутствует сигнал от первой моды  $m=1$ , которая не компенсируется. Таким образом, для выполнения одномодового режима в начале сканирования модой  $m=2$  требуется ограничение диапазона сканирования до  $\lambda \approx 700$  нм, а при достижении максимума этой моды данной длины волны расширение диапазона сканирования до значения  $\lambda_{\max}$  за счет использования дополнительного отсекающего светофильтра.

### ***Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=3$ с компенсацией сигнала от четных порядков интерференции***

В данном случае сканирующей модой является мода  $m=3$ . Таким образом, максимум моды  $m=3$  в начале сканирования должен соответствовать его нижней границе  $\lambda_{\min}$ . Запишем это условие как  $\lambda_{\min 3} = \lambda_{\min}$  (рисунок 5).

При этом положение максимума моды  $m=1$  будет соответствовать  $\lambda_{\min 1} = 3\lambda_{\min}$ , а положение максимума компенсируемой моды  $m=2$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{\min 3} = \frac{\lambda_{\min 1}}{3}$ , а  $\lambda_{\min 2} = \frac{\lambda_{\min 1}}{2}$ , то  $\lambda_{\min 2} = \frac{3\lambda_{\min 3}}{2} = \frac{3\lambda_{\min}}{2}$ .

Соответствующий минимальный зазор  $d_{c \min}$  для сканирующей моды  $m=3$  определяется выражением  $d_{c \min} = \frac{\lambda_{\min 1}}{2} = \frac{3\lambda_{\min}}{2}$ . Соответствующий минимальный зазор  $d_{k \min}$  для компенсируемой моды  $m=2$  равен  $d_{k \min} = \frac{\lambda_{\min 2}}{2} = \frac{3\lambda_{\min}}{4} = \frac{d_{c \min}}{2}$ .

Окончание сканирования в данном случае при компенсации четных порядков интерференции будет соответствовать появлению на нижней границе  $\lambda_{\min}$  моды  $m=5$ . Запишем это условие как  $\lambda_{\max 5} = \lambda_{\min}$ . При этом положение максимума моды  $m=1$  будет соответствовать длине волны  $\lambda_{\max 1} = 5\lambda_{\max 5} = 5\lambda_{\min}$ .

Тогда положение максимума компенсируемой моды  $m=2$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{\max 5} = \frac{\lambda_{\max 1}}{5}$ , а  $\lambda_{\max 2} = \frac{\lambda_{\max 1}}{2}$ , то  $\lambda_{\max 2} = \frac{5\lambda_{\max 5}}{2} = \frac{5\lambda_{\min}}{2}$ .

Положение максимума сканирующей моды  $m=3$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{\max 3} = \frac{\lambda_{\max 1}}{3}$ , то  $\lambda_{\max 3} = \frac{5\lambda_{\max 5}}{3} = \frac{5\lambda_{\min}}{3}$ . Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования  $\lambda_{\max} = \lambda_{\max 3} = \frac{5\lambda_{\min}}{3}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{c \max}$  для сканирующей моды  $m=3$  определяется выражением  $d_{c \max} = \frac{\lambda_{\max 1}}{2} = \frac{5\lambda_{\min}}{2}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{k \max}$  для компенсируемой моды  $m=2$  равен  $d_{k \max} = \frac{\lambda_{\max 2}}{2} = \frac{5\lambda_{\min}}{4} = \frac{d_{c \max}}{2}$ .

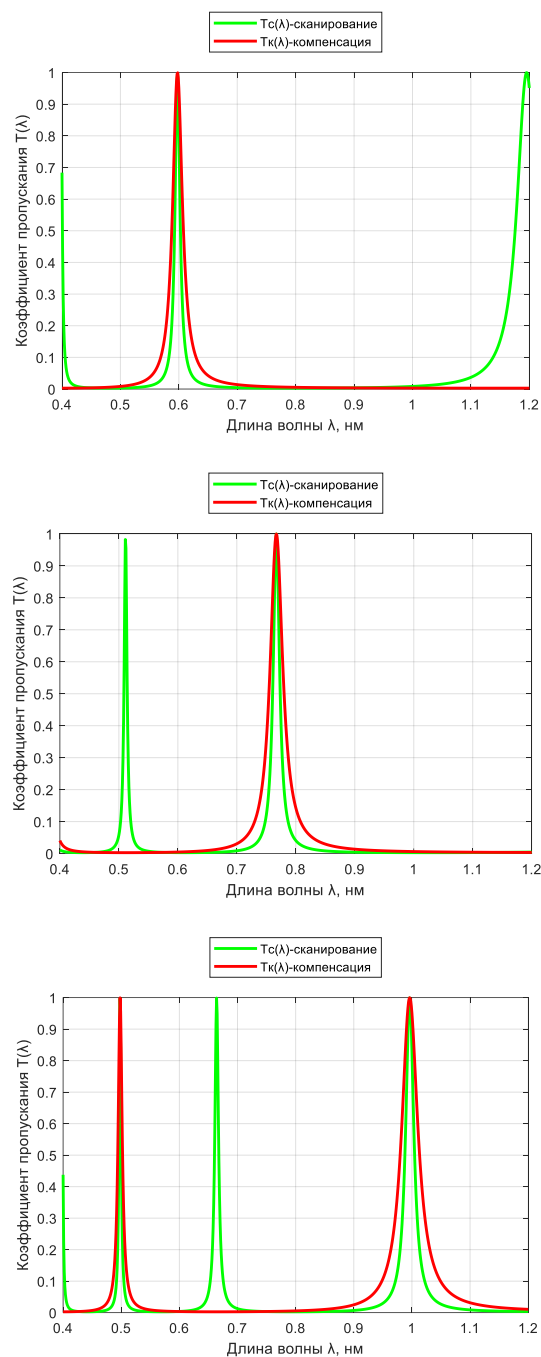


Рисунок 5. Иллюстрация компенсации сигнала от четных мод  $m=2$  и  $m=4$  (график  $T_k(\lambda)$ ) при сканировании видимой области спектра модой  $m=3$  (график  $T_c(\lambda)$ ) в диапазоне от  $\lambda_{min}=400$  нм до  $\lambda_{max}=666$  нм. Графики вверху соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=3$  с компенсацией сигнала от четных порядков интерференции определяется расстоянием между нечетными порядками интерференции  $m=3$  и  $m=5$ .

Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{2}$ , поскольку  $d_{k \min} = \frac{d_{c \min}}{2}$  и  $d_{k \max} = \frac{d_{c \max}}{2}$ .

Параметры сканирования сведены в таблицу 6.

Таблица 6. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции  $m=3$  с компенсацией сигнала от четных порядков интерференции

Параметр	$d_{c \min}$	$d_{c \max}$	$d_{k \min}$	$d_{k \max}$	$\delta d_c$	$\delta d_k$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max 1}$
Значение	$\frac{3\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{5\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{d_{c \min}}{2} = \frac{3\lambda_{\min}}{4}$	$\frac{d_{c \max}}{2} = \frac{5\lambda_{\min}}{4}$	$\delta d_c$	$\frac{\delta d_c}{2}$	$\lambda_{\min}$	$\frac{5\lambda_{\min}}{3}$

Формирование спектральных изображений (рисунок 5) осуществляется следующим образом. Предварительно сканируется диапазон  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне  $[d_{k \min}, d_{k \max}]$  с шагом  $\delta d_k$ , что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания  $T_{k2}(\lambda)$ . Получаемые изображения  $U_{k2}(\lambda)$  запоминаются в блоке памяти.

Затем сканируется диапазон  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне  $[d_{c \min}, d_{c \max}]$  с шагом  $\delta d_c$ , что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания  $T_c(\lambda)$ . Из получаемых при этом изображений  $U_c(\lambda)$  вычитаются полученные на соответствующих шагах сканирования изображения, считываемые с блока памяти. Тем самым в выходных изображениях  $U_{\text{вых}}(\lambda) = U_c(\lambda) - U_{k2}(\lambda)$  производится компенсация сигнала от четных мод, образующихся в процессе сканирования в пределах диапазона  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ .

При этом предполагается предварительное ограничение диапазона сканирования значением  $\lambda_{\max}$ .

### **Увеличение диапазона сканирования за счет дополнительной компенсации сигналов от мод высших порядков интерференции $m=5$ и $m=7$**

Верхнюю границу  $\lambda_{\max}$  при сканировании модой  $m=3$  с компенсацией сигналов от четных порядков интерференции можно увеличить путем дополнительной компенсации сигналов от мод высших порядков интерференции, например  $m=5$  и  $m=7$  (рисунок 6). Для этого требуется дополнительное сканирование с определенным шагом и соответствующим диапазоном изменения воздушного зазора. Рассмотрим процесс дополнительной компенсации сигнала от моды  $m=5$ .

В данном случае минимальный зазор  $d_{k \min}$  для порядка  $m=1$  компенсируемой моды должен соответствовать порядку  $m=5$  сканирующей моды при его появлении на нижней границе диапазона сканирования  $\lambda_{\min}$ . Иначе говоря, зазору  $d_k = \frac{\lambda_{\min}}{2}$  должен

соответствовать зазор  $d_c = \frac{5\lambda_{min}}{2}$  и должно выполняться соотношение  $d_k = \frac{d_c}{5}$ . Таким образом, минимальный зазор  $d_{k min}$  в начале сканирования для компенсируемой моды  $m=5$  равен  $d_{k min} = \frac{d_c min}{5}$ .

Окончание сканирования в данном случае будет соответствовать появлению на нижней границе  $\lambda_{min}$  максимума моды для следующего нечетного порядка интерференции, т. е.  $m=7$ . Запишем это условие как  $\lambda_{max 7} = \lambda_{min}$ .

В этом случае положение максимума моды  $m=1$  будет соответствовать длине волны  $\lambda_{max 1} = 7\lambda_{max 7} = 7\lambda_{min}$ . Положение максимума сканирующей моды  $m=3$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{max 3} = \frac{\lambda_{max 1}}{3}$ , то в данном случае  $\lambda_{max 3} = \frac{7\lambda_{max 7}}{3} = \frac{7\lambda_{min}}{3}$ . Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования увеличивается с  $\lambda_{max} = \frac{5\lambda_{min}}{3}$  до  $\lambda_{max} = \lambda_{max 3} = \frac{7\lambda_{min}}{3}$ , а соответствующий максимальный зазор для сканирующей моды  $m=3$  увеличивается с  $d_{c max} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$  до  $d_{c max} = \frac{\lambda_{min 7}}{2} = \frac{7\lambda_{min}}{2}$ .

Положение максимума компенсируемой моды  $m=5$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{max 5} = \frac{\lambda_{max 1}}{5}$ , то в данном случае  $\lambda_{max 5} = \frac{7\lambda_{max 7}}{5} = \frac{7\lambda_{min}}{5}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{k max}$  для компенсируемой моды  $m=5$  равен  $d_{k max} = \frac{\lambda_{max 5}}{2} = \frac{7\lambda_{min}}{10} = \frac{d_{c max}}{5}$ .

Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{5}$ , поскольку  $d_{k min} = \frac{d_c min}{5}$  и  $d_{k max} = \frac{d_c max}{5}$ .

Параметры сканирования сведены в таблицу 7.

Таблица 7. Параметры сканирования для компенсации сигнала от моды  $m=5$

Параметр	$d_c min$	$d_c max$	$d_k min$	$d_k max$	$\delta d_c$	$\delta d_k$	$\lambda_{min}$	$\lambda_{max 1}$
Значение	$\frac{5\lambda_{min}}{2}$	$\frac{7\lambda_{min}}{2}$	$\frac{d_c min}{5} = \frac{\lambda_{min}}{2}$	$\frac{d_c max}{5} = \frac{7\lambda_{min}}{10}$	$\delta d_c$	$\frac{\delta d_c}{5}$	$\lambda_{min}$	$\frac{7\lambda_{min}}{3}$

Для дополнительной компенсации сигналов от моды  $m=5$  предварительно сканируется диапазон  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$  путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне  $[d_{k min}, d_{k max}]$  с шагом  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{5}$ , что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания  $T_{k5}(\lambda)$ . Получаемые компенсирующие изображения  $U_{k5}(\lambda)$  запоминаются в блоке памяти.

Выходные изображения формируются путем вычитания компенсирующих изображений из соответствующих изображений, полученных от сканирующей моды:  $U_{вых}(\lambda) = U_c(\lambda) - U_{k2}(\lambda) - U_{k5}(\lambda)$  (рисунок 6).



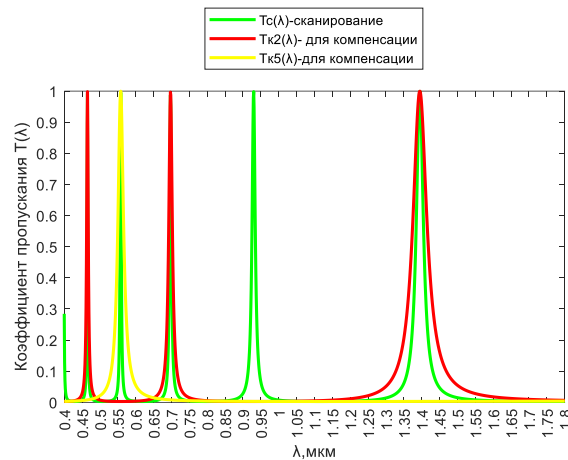


Рисунок 6. Иллюстрация компенсации сигнала от четных мод (график  $T_{k2}(\lambda)$ ) и дополнительной компенсации от моды  $m=5$  (график  $T_{k5}(\lambda)$ ) при сканировании видимой области спектра модой  $m=3$  от  $\lambda_{min}=400$  нм до  $\lambda_{max}=933$  нм (график  $T_c(\lambda)$ ). Графики соответствуют окончанию сканирования

Рассмотрим процесс дополнительной компенсации сигнала от моды  $m=7$ .

В данном случае минимальный зазор  $d_{k\ min}$  для порядка  $m=1$  компенсируемой моды должен соответствовать порядку  $m=7$  сканирующей моды при его появлении на нижней границе диапазона сканирования  $\lambda_{min}$ . Иначе говоря, зазору  $d_k = \frac{\lambda_{min}}{2}$  должен соответствовать зазор  $d_c = \frac{7\lambda_{min}}{2}$  и должно выполняться соотношение  $d_k = \frac{d_c}{7}$ . Таким образом, минимальный зазор  $d_{k\ min}$  в начале сканирования для компенсируемой моды  $m=7$  равен  $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{7}$

Окончание сканирования в данном случае будет соответствовать появлению на нижней границе  $\lambda_{min}$  максимума моды для следующего нечетного порядка интерференции  $m=9$ . Запишем это условие как  $\lambda_{max\ 9} = \lambda_{min}$ .

Тогда положение максимума моды  $m=1$  будет соответствовать длине волны  $\lambda_{max\ 1} = 9\lambda_{max\ 9} = 9\lambda_{min}$ . Положение максимума сканирующей моды  $m=3$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{max\ 3} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{3}$ , то  $\lambda_{max\ 3} = \frac{9\lambda_{max\ 9}}{3} = \frac{9\lambda_{min}}{3} = 3\lambda_{min}$ .

Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования увеличивается с  $\lambda_{max} = \frac{7\lambda_{min}}{3}$  до  $\lambda_{max} = \lambda_{max\ 3} = 3\lambda_{min}$ , а соответствующий максимальный зазор для сканирующей моды  $m=3$  увеличивается с  $d_{c\ max} = \frac{7\lambda_{min}}{2}$  до  $d_{c\ max} = \frac{\lambda_{min\ 9}}{2} = \frac{9\lambda_{min}}{2}$ .

Положение максимума компенсируемой моды  $m=7$  определится исходя из того, что поскольку  $\lambda_{max\ 7} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{7}$ , то в данном случае  $\lambda_{max\ 7} = \frac{9\lambda_{max\ 9}}{7} = \frac{9\lambda_{min}}{7}$ .

Соответствующий максимальный зазор  $d_{k\ max}$  для компенсируемой моды  $m=7$  равен  $d_{k\ max} = \frac{\lambda_{max\ 7}}{2} = \frac{9\lambda_{min}}{14} = \frac{d_{c\ max}}{7}$ .

Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения  $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{7}$ , поскольку  $d_{k \min} = \frac{d_{c \min}}{7}$  и  $d_{k \max} = \frac{d_{c \max}}{7}$ .

Параметры сканирования сведены в таблицу 8.

Таблица 8. Параметры сканирования для компенсации сигнала от моды  $m=7$

Параметр	$d_{c \min}$	$d_{c \max}$	$d_{k \min}$	$d_{k \max}$	$\delta d_c$	$\delta d_k$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max 1}$
Значение	$\frac{7\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{9\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{d_{c \min}}{7} = \frac{\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{d_{c \max}}{7} = \frac{9\lambda_{\min}}{14}$	$\delta d_c$	$\frac{\delta d_c}{7}$	$\lambda_{\min}$	$3\lambda_{\min}$

Для дополнительной компенсации сигналов от моды  $m=7$  предварительно сканируется диапазон  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне  $[d_{k \min}, d_{k \max}]$  с шагом  $\delta d_k$  в соответствии с параметрами, указанными в таблице 8, что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания  $T_{k7}(\lambda)$ . Получаемые компенсирующие изображения  $U_{k7}(\lambda)$  запоминаются в блоке памяти.

Выходные изображения формируются путем вычитания компенсирующих изображений из соответствующих изображений, полученных от сканирующей моды (рисунок 7):  $U_{\text{вых}}(\lambda) = U_c(\lambda) - U_{k2}(\lambda) - U_{k5}(\lambda) - U_{k7}(\lambda)$ . При этом предполагается предварительное ограничение диапазона сканирования значением  $\lambda_{\max}$ .

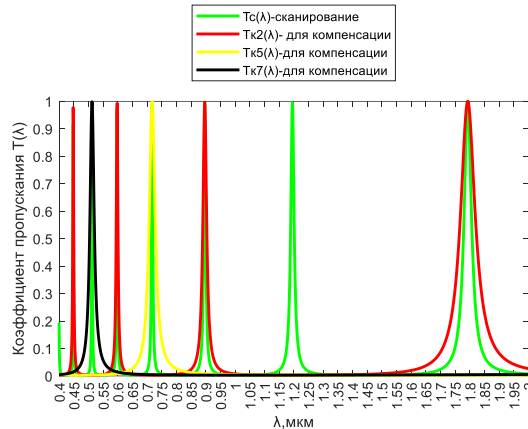


Рисунок 7. Иллюстрация компенсации сигнала от четных мод (график  $T_{k2}(\lambda)$ ) и дополнительной компенсации от моды  $m=5$  (график  $T_{k5}(\lambda)$ ) и моды  $m=7$  (график  $T_{k7}(\lambda)$ ) при сканировании видимой области спектра модой  $m=3$  от  $\lambda_{\min}=400\text{ нм}$  до  $\lambda_{\max}=1200\text{ нм}$  (график  $T_c(\lambda)$ ). Графики соответствуют окончанию сканирования

## Заключение

Диапазон сканирования ГСС на базе ФПИ в одномодовом режиме работы ограничивается расстоянием между смежными модами.

Компенсационные методы формирования изображений ГСС на базе ФПИ обеспечивают возможность расширения диапазона спектрального сканирования с получением изображений, соответствующих заданной сканирующей моде.

Увеличение диапазона сканирования соответствует расстоянию между сканирующей модой и модой, используемой для получения компенсирующих изображений.

Расширение диапазона в одномодовом режиме требует дополнительного сканирования спектрального диапазона на компенсирующей моде, что обуславливает поиск компромисса между быстродействием системы и шириной диапазона сканирования.

## Список литературы

1. Чесноков А. Е. Исследование оптических характеристик многослойных структур управляемого резонатора Фабри–Перо // Гео-Сибирь-2007: сборник материалов III Международного научного конгресса, 25–27 апреля 2007 г.: в 6 т. Т. 4, ч. 1: Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Новосибирск: Сибирская государственная геодезическая академия, 2007. С. 167–170.
2. Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Кочкарев Д. В., Никулин Д. М., Шергин С. Л. Гиперспектральные видеоанализаторы на основе электроуправляемых интерферометров Фабри–Перо // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015: сборник материалов XI Международного научного конгресса и Международной научной конференции «СибОптика–2015», 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: в 3 т. Т. 1. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. 3–11.
3. 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
4. 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: 10.34680/20768052.2023.5(134).680-687
5. 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
6. Хорохоров А. М., Ивашкина Е. С., Гурылева А. В. Патент № 2801836 С1 Российская Федерация, МПК G01J 3/02 (2023,05), G01N 21/25 (2023,05). Быстродействующий гиперспектрометр с управляемым спектральным фильтром: № 2022131265: заявл. 30.11.2022: опубл. 16.08.2023; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана».

7. Гурылева А. В., Хорохоров А. М., Кобозев В. С. Методы повышения спектрального разрешения изображающих спектрометров, построенных на основе многоканальных приемников излучения // Светотехника. 2020. 3. 78–85.

8. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А., Гуляев А. А., Московский М. Н. Патент № 230837 Российская Федерация МПК H04N7/00 (2024.08), G01J3/02 (2024.08), G01J3/28 (2024.08), G01J 3/50 (2024.08), G01N 21/25 (2024.08). Телевизионное гиперспектральное устройство: 2024126336: заявл. 06.09.2024; опубл. 23.12.2024; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого».

9. Бутиков Е. И. Оптика: учебное пособие. 3-е изд., доп. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 608 с.

## References

1. Chesnokov A. E. Investigation of optical characteristics of multilayer structures of a controlled Fabry–Perot resonator // Proceedings of the III International Scientific Congress "GEO-Siberia-2007". Vol. 4. Part 1. Novosibirsk: SGGA, 2007. 167–170. (In Russian).

2. Chesnokov, V. V., Chesnokov, D. V., Kochkarev, D. V., Nikulin, D. M., Shergin, S. L. Hyperspectral video analyzers based on electro-controlled Fabry–Perot interferometers // Interexpo GEO–Siberia–2015: Proceedings of the 11th International Scientific Congress and International Conference "SibOptica–2015", Novosibirsk, April 13–25, 2015. Vol. 1. Novosibirsk: Siberian State University of Geosystems and Technologies Publ., 2015. 3–11. (In Russian).

3. 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

4. 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 (In Russian).

5. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Computer simulation of singlemode 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 (In Russian).

6. Khorokhorov, A. M., Ivashkina, E. S., Guryleva, A. V. High-speed hyperspectrometer with a controlled spectral filter. // Patent of the Russian Federation No. 2801836 C1. IPC G01J 3/02 (2023.05), G01N 21/25 (2023.05). Application No. 2022131265, filed 30 Nov 2022, published 16 Aug 2023. Applicant: Bauman Moscow State Technical University. (In Russian).

7. Guryleva A. V., Khorokhorov A. M., Kobozev V. S. Methods of increasing the spectral resolution of imaging spectrometers based on multichannel radiation receivers // 2020. 3. 78–85. (In Russian).

8. Gareev, V. M., Gareev, M. V., Kornyshev, N. P., Serebryakov, D. A., Gulyaev, A. A., Moskovsky, M. N. Television hyperspectral device. // Patent of the Russian Federation No. 230837. IPC H04N 7/00 (2024.08), G01J 3/02 (2024.08), G01J 3/28 (2024.08),

G01J 3/50 (2024.08), G01N 21/25 (2024.08). Appl. No. 2024126336, filed 06 Sep 2024, publ. 23 Dec 2024. Applicant: Yaroslav-the-Wise Novgorod State University. (In Russian).

9. Butikov E. I. Optics: Textbook. 3rd ed., revised and expanded. St. Petersburg: Lan' Publ., 2012. 608 p. (In Russian).

#### **Информация об авторах**

*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