

Расчёт спектральной линзы для получения нормализованного вегетационного индекса

А.А. Расторгуев¹, С.И. Харитонов^{1,2}, Н.Л. Казанский^{1,2}, А.В. Никоноров^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

² Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Аннотация

Предложена концепция новой дисперсионной оптической системы, осуществляющей формирование изображения в узких спектральных каналах. Данная оптическая система основана на обыкновенной собирающей линзе в сочетании с кодированной апертурой и дифракционной решёткой. Разработан градиентный метод расчёта и проведён расчёт фазовой функции на входной апертуре линзы для разделения длин волн 650 нм и 750 нм. Расчётным методом показана способность оптической системы передавать пространственные частоты на контрастном изображении предмета. По сравнению с известными компактными спектральными системами, предложенная спектральная линза характеризуется упрощённой конструкцией и низкой стоимостью изготовления, что позволяет её применять для решения различных задач точного сельского хозяйства.

Ключевые слова: спектральная линза, градиентный метод, волновая оптика, дифракционный оптический элемент.

Цитирование: Расторгуев, А.А. Расчёт спектральной линзы для получения нормализованного вегетационного индекса / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский, А.В. Никоноров // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 6. – С. 961-971. – DOI: 10.18287/COJ1806.

Citation: Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL, Nikonorov AV. Calculation of the spectral lens to obtain a normalized vegetation index. Computer Optics 2025; 49(6): 961-971. DOI: 10.18287/COJ1806.

Введение

В настоящий период наблюдается значительный рост рынка данных дистанционного зондирования Земли, а также активное совершенствование методов обработки и классификации данных [1–4], что в свою очередь обуславливает перспективность данного направления в решении разнообразных задач потребителей информации. Параллельно происходит интенсивное развитие беспилотных авиационных систем (БАС) [5] и средств мониторинга, интегрируемых с ними [6]. Особый интерес представляют мульти- и гиперспектральные системы, которые обладают высоким потенциалом применения, например в интеллектуальных системах управления сельским хозяйством [7–9] за счет возможности получения данных в большом числе спектральных каналов. Наряду с развитием БАС наблюдается тенденция к снижению массогабаритных характеристик систем мониторинга. В контексте конкретных агротехнических задач важной становится разработка компактных и легких специализированных систем мониторинга, способных обеспечивать регистрацию данных по информативным спектральным каналам [10, 11]. Данные спектральные каналы применяются для расчёта вегетационных индексов, которые в свою очередь могут использоваться в качестве входного признака

регрессионной модели, используемой для решения множества задач управления сельским хозяйством: оценка и прогнозирование урожайности [12–14]; определение содержания хлорофилла, азота, воды [15–17]; определение и картирование заражений [18–20] и др. Для вычисления вегетационных индексов обычно используются относительно узкие спектральные каналы. В оптическом диапазоне электромагнитного спектра под относительно узким спектральным каналом обычно понимается интервал спектральной выборки (приходящийся на пиксель регистратора) не более 10 нм, под относительно широким – интервал спектральной выборки шириной в десятки или сотни нанометров [21].

Различают множество подходов к разделению светового потока в узкие спектральные каналы, которые реализуются в миниатюрных спектрометрах, это: дисперсионный, фильтрующий, на основе преобразования Фурье. Дисперсионные оптические схемы миниатюрных спектрометров могут использовать: отражающую плоскую [22] или вогнутую [23] дифракционные решётки; сочетание в одном элементе линзы Френеля и дифракционной решётки [24]; различные волноводные схемы в сочетании с дифракционной решёткой внутри [25, 26], фотонным кристаллом [27], цифровой планарной голограммой [28], решёткой эшелле [29], а также схемы основанные на волноводной решётке [30]. В

свою очередь, миниатюрные спектрометры на основе узкополосных фильтров могут быть реализованы с использованием: настраиваемых акустооптических [31], жидкокристаллических [32] фильтров, фильтров Фабри-Перо [33]; массивов фильтров Фабри-Перо [34], основанных на тонких плёнках [35], фотонных кристаллах [36], метаповерхностях [37]; линейно переменных фильтров клиновидных [38] или градиентных [39]. Миниатюрные Фурье спектрометры обычно основаны на интерферометрах Майкельсона [40], Маха-Цендера [41] и т.д. Приведённые выше спектрометры, позволяют получать информацию в десятках – сотнях узких спектральных каналов, при этом, как уже было отмечено ранее, для решения конкретных задач, наличие такого множества спектральных каналов является избыточным. При этом имеются технологические ограничения при изготовлении многих компонент (например, узкополосных фильтров, тонких плёнок и т.п.).

Если рассмотреть изображающие мультиспектральные датчики, то для получения изображения в нескольких спектральных каналах традиционно используются фотоприёмные матрицы с цветными фильтрами типа Байера или альтернативными, например [42]. В работе [43] вместо цветных фильтров используется матрица дифракционных фильтров. В работе [44] рассматривается оптическая система, состоящая из ДОЭ и матрицы цветных светофильтров, устанавливаемых вблизи фотоприёмной матрицы. Особенностью спектральных или дифракционных фильтров для вышеприведённых систем является пропускание в относительно широком интервале длин волн оптического диапазона электромагнитного спектра. Однако использование ДОЭ [44] в схеме с таким фильтром позволяет формировать изображение в гармониках т.е. узких спектральных каналах. Другой стратегией спектрального разделения может быть сочетание рефракционно-дифракционных оптических систем с кодированной апертурой [45], а также, например, рассмотренных выше, узкополосных фильтров [35, 38]. Таким образом, в таких датчиках для спектрального разделения светового потока и формирования изображения необходимо использование как минимум двух элементов, оптического и фильтрующего световой поток.

Интересной представляется разработка конструктивно более простых и недорогих в изготовлении оптических систем, которые реализуют получение изображения в выбранных спектральных каналах без использования дополнительных светофильтров. Метод расчёта подобной системы – спектральной дифракционной линзы (СДЛ) рассмотрен в работе [46]. Такой СДЛ реализует спектральное разделение светового потока для выбранных длин волн и формирование оптического изображения на монохромном фотоприёмнике. В

работах [47 – 49] рассматривается изготовление СДЛ для решения различных прикладных задач. Рассматриваемые СДЛ формируют изображение в спектрах ± 1 порядка дифракции, при этом используется коллимирующая оптическая система, устанавливаемая непосредственно перед СДЛ [47].

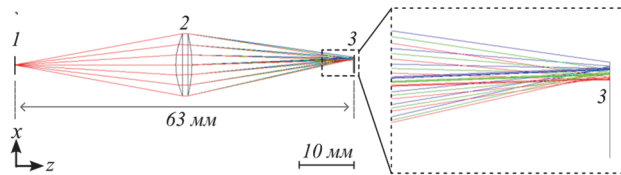
В отличие от [24, 46 – 49] в настоящей работе предлагается исследовать возможность использования обыкновенной собирающей линзы в качестве элемента, формирующего оптическое изображение в узких спектральных каналах. Настоящая статья состоит из нескольких разделов. В первом разделе рассматривается концепция такой линзы, а также выбираются её конструктивные параметры. Во втором – представлен математический аппарат, использованный для расчёта кодированной апертуры на входной плоскости перед линзой. В третьем и четвёртом разделах проводится вычислительный эксперимент по расчёту фазовых и эйкональной функции на входной плоскости линзы и оцениваются передаточные характеристики полученной модели линзы. Анализ полученных результатов проводится в пятом разделе.

1. Постановка задачи

В качестве стратегии спектрального разделения светового потока линзой было выбрано применение пропускающей дифракционной решётки, аналогично [24, 46]. Было принято, аналогично [46], что решётка нанесена на вторую поверхность линзы. В предметной области такой линзы располагается апертурная диафрагма (или щель) и при этом линза должна формировать изображение апертурной диафрагмы в узких спектральных каналах без использования дополнительных коллимирующих элементов. Известно, что при нахождении предмета на расстоянии $a = 2f$ от собирающей линзы получается действительное, зеркально перевёрнутое и равное по величине предмету изображение на расстоянии $a' = 2f$. Поэтому данная концепция была выбрана при расчёте параметров такой линзы. Также было выбрано что суммарное расстояние от предметной до изображающей плоскостей должно быть менее 100 мм, при этом спектральное разделение должно происходить в диапазоне от 600 до 800 нм, где находится большое число узкополосных вегетационных индексов [12 – 20].

Расчёт параметров поверхностей проводилась с использованием инструментов трассировки и локальной оптимизации Zemax с применением оценочной функции RMS – Spot Radius. Точечные диаграммы (или пятна рассеяния) относительно минимальных размеров (радиус несколько десятков микрометров) по полосе захвата линзы были получены в спектре первого порядка только на одной длине волны, тогда как на других длинах волн, радиусы пятен составляли сотни микрометров в результате

чего происходило их значительное взаимное перекрытие. С учётом этого проводился подбор параметров при условии того, что размеры пятен рассеяния должны быть приблизительно одинаковыми в рассматриваемых диапазонах изменения спектральных и пространственных координат. В результате такой оптимизации линзы в Zemax для трёх длин волн 600 нм, 700 нм, 800 нм в спектре первого порядка для областей в центре и на краях поля зрения (0,1 мм, -1 мм) были получены параметры линзы (рис. 1), у которой первая поверхность (по ходу распространения светового пучка) является чётной асферикой, а вторая сферической с дифракционной решёткой, имеющей частоту штрихов 50 лин/мм. Радиус кривизны первой поверхности $R_1 = 21$ мм (параметры чётной асферики $\alpha_1 = 18,100, \alpha_2 = -1,041 \times 10^5, \alpha_3 = 6,907 \times 10^7$), второй – $R_2 = -22$ мм. Толщина линзы составила 3 мм, диаметр 11 мм, а общее расстояние от предметной плоскости до плоскости изображения – 63 мм.



1 - предметная плоскость, 2 - линза, 3 - плоскость изображения
 Рис. 1. Ход лучей в Zemax (меридиональное сечение) для трёх длин волн 600 нм, 700 нм, 800 нм (красный, зелёный и синий цвета) и увеличенное изображение пересечения лучей плоскости изображения в спектре первого порядка

На рис. 2 показаны точечные диаграммы (точки пересечения лучей плоскости изображения), полученные в Zemax для трёх длин волн в спектре первого порядка.

Из рис. 2 видно, что точечные диаграммы имеют достаточно большой радиус, что не предполагает регистрацию спектра в узких спектральных каналах, а также использование линзы в качестве изображающей

системы. Устранение данных ограничений возможно при использовании концепции кодированной апертуры, аналогично работе [45]. Для получения корректных результатов, на начальном этапе, через оптимизированную в Zemax линзу, была проведена трассировка лучей с использованием разработанной моделирующей программы. Для моделирования геометрооптического распространения лучей через линзу использовались соотношения, приведённые в работах [50–52]. На рис. 3а показаны точечные диаграммы для трёх длин волн, полученные с использованием моделирующей программы.

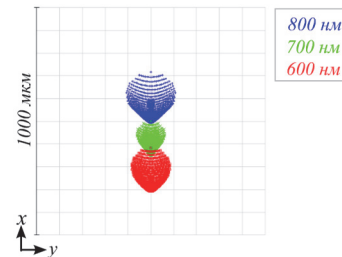


Рис. 2. Точечные диаграммы, полученные в Zemax для трёх длин волн 600 нм, 700 нм, 800 нм (снизу вверх соответственно). Шаг сетки на рисунке составляет 100 мкм

Из рис. 3б видно, что, полученные в Zemax и моделирующей программе, точечные диаграммы имеют почти идентичную форму и размеры, что свидетельствует о корректности работы программы геометрооптического моделирования. В дальнейшем данная программа будет использоваться в качестве фрагмента программы, моделирующей распространение световых волн через линзу в приближении скалярной волновой теории. Далее рассмотрим математический аппарат, использованный для моделирования прохождения световой волны через линзу и расчёта (кодированной апертуры) фазовой или эйкональной функции на её входной плоскости.

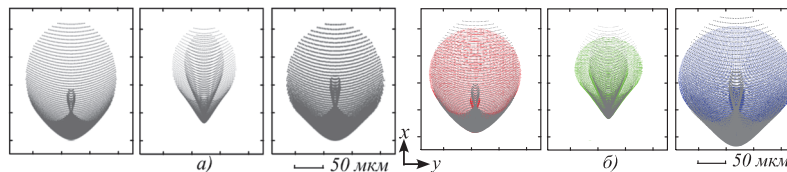


Рис. 3. Точечные диаграммы пятен рассеяния линзы для трёх длин волн 600 нм, 700 нм, 800 нм (слева направо): полученные в моделирующей программе (а); в сравнении с диаграммами в Zemax (выделены цветом) (б)

2. Математический аппарат для моделирования

2.1. Вычисление поля в плоскости изображения

Рассмотрим точечный источник света, расположенный в предметной плоскости с декартовыми координатами (x_0, y_0) . На расстоянии r_1 от предметной плоскости расположена входная плоскость с координатами (ξ, η) . Далее за входной плоскостью расположена линза, после которой находится выходная плоскость с декартовыми

координатами (u, v) . В настоящем исследовании было выбрано, что входная и выходная плоскости перпендикулярны оптической оси и проходят непосредственно через вершины соответствующих поверхностей линзы. За выходной плоскостью на расстоянии r_2 расположена плоскость изображения с декартовыми координатами (x, y) . Рассматриваемый источник из точки $(x_0 = -M, y_0 = -S)$ испускает сферическую волну, которая проходит, через входную плоскость и попадает на первую асферическую

поверхность линзы. После прохождения второй сферической поверхности линзы, на которую нанесена дифракционная решётка, образуется сходящаяся сферическая волна. Эта волна проходит через выходную плоскость и фокусируется в окрестности точки с координатами $(x = M + \Delta x, y = S)$ плоскости изображения, где Δx – смещение точки фокусировки в зависимости от длины волны и порядка дифракции.

Связь комплексной амплитуды в выходной плоскости и плоскости изображения в общем случае имеет вид:

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} A_2(u, v) \exp(ik\Psi_2(u, v)) G(x, y, u, v) dudv, \quad (1)$$

где $G(x, y, u, v)$ – ядро интегрального преобразования, $A_2(u, v), \Psi_2(u, v)$ – амплитуда и эйконал в плоскости (u, v) .

Пусть у нас есть лучевое преобразование, связывающее плоскости (ξ, η) и (u, v) . Это преобразование представим в виде: $u = U(\xi, \eta), v = V(\xi, \eta)$. Данное преобразование легко найти, используя законы геометрической оптики.

Перейдём от интегрирования по координатам (u, v) , к координатам (ξ, η) :

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} A_2(U(\xi, \eta), V(\xi, \eta)) \times \exp(ik\Psi_2(U(\xi, \eta), V(\xi, \eta))) \times G(x, y, U(\xi, \eta), V(\xi, \eta)) dudv. \quad (2)$$

Обозначим:

$$\Phi_2(\xi, \eta) = \Psi_2(U(\xi, \eta), V(\xi, \eta)), \quad (3)$$

$$A_2(\xi, \eta) = A_2(U(\xi, \eta), V(\xi, \eta)). \quad (4)$$

В свою очередь эйконал в выходной плоскости можно представить как:

$$\Phi_2(\xi, \eta) = \Phi_1(\xi, \eta) + L(\xi, \eta), \quad (5)$$

где $\Phi_1(\xi, \eta)$ – эйконал в точке (ξ, η) на входной плоскости, $L(\xi, \eta)$ – длина оптического пути от точки входа (ξ, η) до точки выхода с координатами (u, v) .

Перепишем выражение (2) в виде:

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} A_2(\xi, \eta) \exp(ik\Phi_2(\xi, \eta)) \times G(x, y, U(\xi, \eta), V(\xi, \eta)) J(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (6)$$

где якобиан $J(\xi, \eta) = \left| \frac{\partial U(\xi, \eta)}{\partial \xi} \frac{\partial V(\xi, \eta)}{\partial \eta} - \frac{\partial U(\xi, \eta)}{\partial \eta} \frac{\partial V(\xi, \eta)}{\partial \xi} \right|$.

Интенсивности в плоскостях (ξ, η) и (u, v) связаны законом сохранения светового потока:

$$I_1(\xi, \eta) \tau(\xi, \eta, u, v) \cos \alpha(\xi, \eta) d\xi d\eta = I_2(u, v) \cos \beta(u, v) dudv, \quad (7)$$

где $\alpha(\xi, \eta)$ – угол между лучом и нормалью в плоскости (ξ, η) , $\beta(u, v)$ – угол между лучом и нормалью в плоскости (u, v) , $\tau(\xi, \eta, u, v)$ – пропускание среды.

Отсюда, амплитуды связаны соотношением:

$$A_2(u, v) = A_1(\xi, \eta) \times \sqrt{\tau(\xi, \eta, u, v) \cos \alpha(\xi, \eta) / (\cos \beta(u, v) J(\xi, \eta))}. \quad (8)$$

Обозначим $\gamma(\xi, \eta) = \beta(u(\xi, \eta), v(\xi, \eta))$, $\chi(\xi, \eta) = \tau(\xi, \eta, u(\xi, \eta), v(\xi, \eta))$. В итоге выражение (6) с учётом (5) и (8) можно представить в виде:

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(\xi, \eta) T(\xi, \eta) G(x, y, \xi, \eta) \sqrt{J(\xi, \eta)} d\xi d\eta, \quad (9)$$

где $E_1(\xi, \eta) = A_1(\xi, \eta) \exp(ik\Phi_1(\xi, \eta))$ – это комплексная амплитуда в точке с координатами (ξ, η) , а функция:

$$T(\xi, \eta) = \exp(ikL(\xi, \eta)) \sqrt{\chi(\xi, \eta) \cos \alpha(\xi, \eta) / \cos \gamma(\xi, \eta)} \quad (10)$$

описывает изменение амплитуды и эйконала волны между точками (ξ, η) и (u, v) .

Полученное соотношение (9) позволяет вычислить поле в плоскости изображения по координатной сетке входной плоскости. Данный подход может быть использован для моделирования распространения поля через N оптических систем.

2.2. Градиентный метод расчёта ДОО

Связь между входным $E^l(u, v)$ и выходным $E^{l+1}(x, y)$ сигналами при распространении в свободном пространстве в общем виде имеет вид:

$$E^{l+1}(x, y) = \int E^l(u, v) G(x, y, u, v) dudv, \quad (11)$$

где $G(x, y, u, v)$ – ядро интегрального преобразования.

Представим интеграл (11) в дискретном виде, при этом для простоты, описание осей координат в дальнейшем опустим:

$$E_{ij}^{l+1}(x, y) = \sum_{pq} E^l(u_p, v_q) G(x_i, y_j, u_p, v_q) \Delta u \Delta v = \sum_{pq} E_{pq}^l P_{ij}^{pq}, \quad (12)$$

где ядро преобразования $P_{ij}^{pq} = G(x_i, y_j, u_p, v_q) \Delta u \Delta v$.

Рассмотрим нашу оптическую систему. Поле на входной плоскости (ξ, η) ДОО:

$$E_{ij}^1 = \sum_{pq} E_{pq}^0 P_{ij}^{pq}, \quad (13)$$

где E_{pq}^0 – поле в предметной плоскости (x_0, y_0) .

Поле, после прохождения ДОО:

$$U_{ij}^1 = A_{ij} \exp(i\Psi_{ij}^1) E_{ij}^1, \quad (14)$$

где A_{ij} – учитывает изменение амплитуды, а Ψ_{ij}^1 – длины оптического пути от точек входа с координатами (ξ, η) до точек выхода с координатами (u, v) .

Выражение для поля в плоскости изображения (x, y) :

$$E_{ij}^2 = \sum_{pq} U_{pq}^1 Q_{ij}^{pq}, \quad (15)$$

где Q_{ij}^{pq} – ядро преобразования.

Рассмотрим расчёт фазовой функции на входной плоскости ДОЭ путём минимизации некоторого функционала. В качестве такого функционала выберем квадратичный функционал, выражение для которого имеет вид [53]:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \sum_{ij} (I_{ij} - b_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (16)$$

где I_{ij} – интенсивность в плоскости изображения, b_{ij} – заданное распределение интенсивности.

Найдём приращение функционала, вызванное приращением фазовой функции Ψ_{pq}^1 :

$$\partial \mathcal{E} = \sum_{ij} (I_{ij} - b_{ij}) \partial I_{ij}, \quad (17)$$

$$\partial I_{ij} = (\partial \sum_{pq} U_{pq}^1 Q_{ij}^{pq}) (\sum_{pq} (U_{pq}^1 Q_{ij}^{pq})^*) + (\sum_{pq} U_{pq}^1 Q_{ij}^{pq}) (\partial \sum_{pq} (U_{pq}^1 Q_{ij}^{pq})^*), \quad (18)$$

где * – означает комплексное сопряжение. Далее получаем:

$$\partial I_{ij} = \text{Re} \{ (\sum_{pq} \partial U_{pq}^1 Q_{ij}^{pq}) (\sum_{st} (U_{st}^1 Q_{ij}^{st})^*) \}, \quad (19)$$

где с учётом (14):

$$\begin{aligned} \sum_{pq} \partial U_{pq}^1 Q_{ij}^{pq} &= \\ &= \sum_{pq} \partial \Psi_{pq}^1 \{ i A_{pq} \exp(i \Psi_{pq}^1) E_{pq}^1 \} Q_{ij}^{pq}. \end{aligned} \quad (20)$$

Подставляя (19), (20) в (17) получаем:

$$\begin{aligned} \partial \mathcal{E} &= \sum_{pq} \partial \Psi_{pq}^1 \text{Re} \{ \sum_{ij} (I_{ij} - b_{ij}) \times \\ &\times \left((\sum_{st} (U_{st}^1 Q_{ij}^{st})^*) \{ i A_{pq} \exp(i \Psi_{pq}^1) E_{pq}^1 \} Q_{ij}^{pq} \right) \}. \end{aligned} \quad (21)$$

Тогда выражение для градиента функционала (16) имеет вид:

$$\begin{aligned} \nabla_{pq} \mathcal{E} &= \text{Re} \{ \sum_{ij} (I_{ij} - b_{ij}) \times \\ &\times \left((\sum_{st} (U_{st}^1 Q_{ij}^{st})^*) \{ i A_{pq} \exp(i \Psi_{pq}^1) E_{pq}^1 \} Q_{ij}^{pq} \right) \}. \end{aligned} \quad (22)$$

Рассмотренный функционал ошибки (16) накладывает условие как на значения, так и на форму распределения интенсивности в плоскости изображения. Для решения задачи расчёта ДОЭ может быть достаточным условие фокусировки в заданную область. В таком случае выражение для квадратичного функционала имеет вид:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} (\sum_{\Omega} I_{ij} - b)^2 \rightarrow \min, \quad (23)$$

где b – значение интенсивности в области фокусировки Ω .

Проводя аналогичные действия с функционалом, получим выражение для градиента:

$$\begin{aligned} \nabla_{pq} \mathcal{E} &= (\sum_{\Omega} I_{ij} - b) \times \\ &\times \text{Re} \{ \sum_{\Omega} (\sum_{st} (U_{st}^1 Q_{ij}^{st})^*) \\ &(\{ i A_{pq} \exp(i \Psi_{pq}^1) E_{pq}^1 \} Q_{ij}^{pq}) \}. \end{aligned} \quad (24)$$

Полученные соотношения легко модифицируются для случая нахождения градиента функционала, вызванного приращением эйкональной функции на

входной плоскости. Отметим, что рассмотренный выше подход может быть использован для нахождения приращения функционала для оптической системы, состоящей из нескольких ДОЭ.

2.3. Метод Adam для расчёта ДОЭ

В настоящей работе для минимизации функционала применялся метод стохастической оптимизации Adam (Adaptive Moment Estimation). Данный метод широко используется во многих отраслях науки и техники, где задачи можно свести к оптимизации некоторой скалярной параметризованной целевой функции с учётом условия её максимизации или минимизации относительно её параметров. Метод вычисляет индивидуальные адаптивные скорости обучения для различных параметров на основе оценок первого и второго моментов градиентов [54]. Расчёт приближений целевой (фазовой или эйкональной) функции T осуществлялся по следующему алгоритму:

- 1) Вычисляется распространение поля от предметной до входной плоскости ДОЭ и от выходной плоскости ДОЭ до плоскости изображения. Далее вычисляется комплексно-сопряжённое поле $(\sum_{st} (U_{st}^1 Q_{ij}^{st})^*)^*$ в плоскости изображения.
- 2) По формулам аналогичным (22) или (24) вычисляется градиент функционала $\nabla_{pq} \mathcal{E}$, вызванный приращением целевой функции.
- 3) Осуществляется расчёт нового приближения целевой функции на шаге n по формуле:

$$T_n = T_{n-1} - \alpha \cdot \tilde{m}_n / (\sqrt{\tilde{v}_n} + \epsilon), \quad (25)$$

где параметры α – величина шага, ϵ – малая константа (для предотвращения деления на нуль) задаются, а \tilde{m}, \tilde{v} – оценки первого и второго моментов с поправкой на смещение вычисляются по соотношениям, приведённым в работе [54].

3. Вычислительный эксперимент по расчёту ДОЭ

3.1. Исходные параметры расчёта

Для расчёта использовалась математическая модель асферической линзы, представленная в данной работе. Входная плоскость линзы имела форму зрачка с диаметром 10 мм и разбивалась с шагом 10 мкм. Размер плоскости изображения в сагиттальном направлении составлял около 2 мм, тогда как в направлении дисперсии размер изображения определялся диаметрами геометрооптических пятен рассеяния и спектральным диапазоном, в котором проводился расчёт. Дискретизация в плоскости изображения также составляла 10 мкм. Расчёты проводились с учётом фокусировки световых пучков в спектре первого порядка. Следует отметить, что параметры линзы, полученные в первом разделе, были оптимизированы для диапазона длин волн от 600 до

800 нм, что позволяет выбрать в данном диапазоне информативные длины волн для вычисления определённых вегетационных индексов. Ниже приведены результаты вычислительных экспериментов по фокусировке излучения для выбранных длин волн из рассматриваемого спектрального диапазона.

3.2. Расчёт фазовой функции

На первом этапе был проведён эксперимент по расчёту фазовой функции на длине волн $\lambda = 700$ нм с учётом фокусировки по полосе захвата оптической системы линзы. Для этого в плоскости изображения задавалось 5 точек фокусировки, которые в сагиттальном направлении имели координаты: -1 мм, $-0,5$ мм, 0 мм, $0,5$ мм, 1 мм (которые соответствовали 5-ти сферическим точечным источникам в предметной плоскости). Таким образом, на каждой итерации приближение фазовой функции вычислялось для 5-ти падающих пучков. Необходимо отметить, что координаты точек фокусировки выбирались такими же, как при оптимизации линзы в Zemax, с добавлением дополнительных точек с координатами $-0,5$ мм и $0,5$ мм. Это было сделано с целью формирования фазовой функции, которая учитывает фокусировку в промежуточных точках поля зрения линзы.

Вид вычисленных фазовых функции представлен на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что, полученные результаты расчёта для двух вариантов начальных фаз, имеют схожую картину фазовых профилей. На рис. 5 показаны распределения интенсивности в плоскости изображения, полученные на длине волн 700 нм от сферического точечного источника в предметной плоскости. При этом в расчёте фазовая функция на входной плоскости линзы не учитывалась.

Из рис. 5 видно, что распределение интенсивности находится внутри области с размерами приблизительно 120×120 мкм. На рис. 6 показаны распределения интенсивностей в плоскости изображения для центра и краёв поля зрения, полученные с аналогичными параметрами расчёта. При этом в расчётах учитывались фазовые функции на входной плоскости линзы. Распределения интенсивностей внутри поля зрения, как для координат $y = -0,5$ мм и $0,5$ мм (на рис 6 не показаны), так и всех остальных сагиттальных координат имеют схожий характер.

Полученные распределения интенсивностей локализованы в области с размерами приблизительно 30×30 мкм для всех точек поля зрения линзы. Полученные результаты позволяют перейти ко второму этапу исследования, на котором необходимо провести оценку возможности фокусировки излучения в два узких спектральных канала, что в свою очередь позволит использовать линзу для получения индексных изображений.

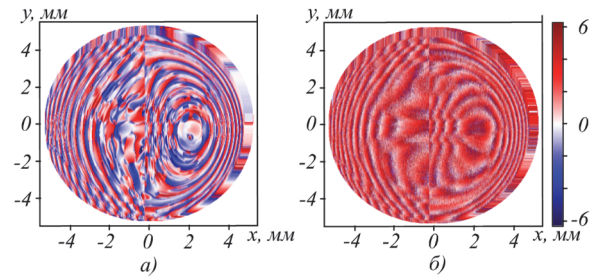


Рис. 4. Фазовые функции на входной плоскости линзы, рассчитанные при начальной фазе: (а) нулевой, (б) случайной

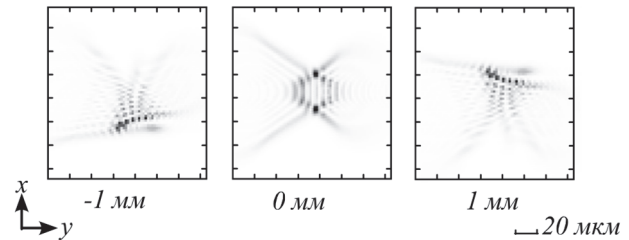


Рис. 5. Распределения интенсивностей в плоскости изображения в окрестности точек фокусировки в центре и на краях поля зрения без учёта рассчитанной фазовой функции

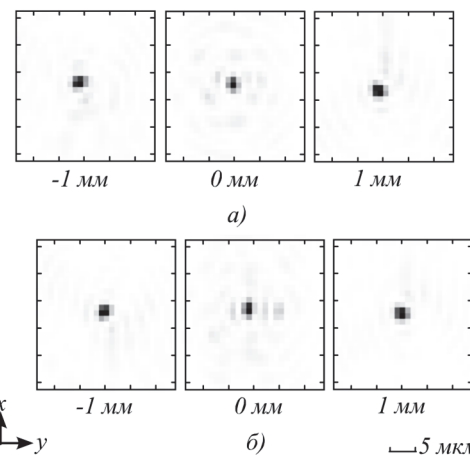


Рис. 6. Распределения интенсивностей в плоскости изображения в окрестности точек фокусировки по сагиттальной координате (-1 мм, 0 мм, 1 мм) для двух вариантов фазовой функций на рис. 4 (а) и (б)

3.3. Расчёт эйкональной функции

На втором этапе был проведён вычислительный эксперимент по расчёту эйкональной функции для длин волн $\lambda_1 = 650$ нм и $\lambda_2 = 750$ нм. Длины волн были выбраны для получения изображения нормализованного дифференцированного вегетационного индекса NDVI [55]. Аналогично 3.2 в плоскости изображения для каждой длины волн задавалось 5 точек фокусировки, которые в сагиттальном направлении имели координаты: -1 мм, $-0,5$ мм, 0 мм, $0,5$ мм, 1 мм. Таким образом, на каждой итерации приближение эйкональной функции вычислялось для 10-ти падающих пучков. Вид вычисленной эйкональной функции представлен на рис. 7.

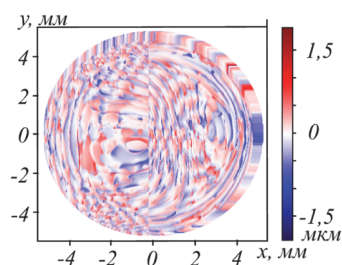


Рис. 7. Эйкональная функция на входной плоскости линзы, рассчитанная при нулевом начальном эйконале

На рис. 8 представлены распределения интенсивности в плоскости изображения для центра и краёв поля зрения, полученные для длин волн 650 нм и 750 нм с учётом рассчитанной эйкональной функции. Распределения интенсивностей внутри поля зрения, как для координат $y = -0,5$ мм и $0,5$ мм (на рис. 8 не показаны), так и всех остальных сагиттальных координат имеют схожий характер.

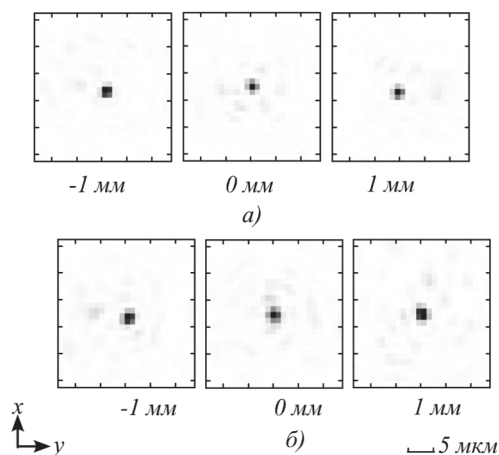


Рис. 8. Распределения интенсивностей в плоскости изображения в окрестности точек фокусировки по сагиттальной координате (-1 мм, 0 мм, 1 мм) для двух длин волн 650 нм (а) и 750 нм (б)

Вычисленные распределения интенсивностей также локализованы в области приблизительно 30×30 мкм для всех точек поля зрения линзы.

4. Расчёт передаточных характеристик ДОО

Для оценки способности оптической системы формировать изображение был проведён расчёт функций рассеяния точки (ФРТ) спектральной линзы, с учётом того, что параметры пучка, падающего на предметную плоскость со стороны объектива, будут соответствовать дифракционно-ограниченному объективу с диафрагменным числом $k = 3$. Полученные результаты расчётов ФРТ не значительно отличаются от вида распределений на рис. 8. Для оценки способности оптической системы передавать пространственные частоты в изображении предмета и оценки качества изображения обычно используется частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) [56, 57]. На рис. 9 показаны ЧКХ линзы для двух спектральных каналов.

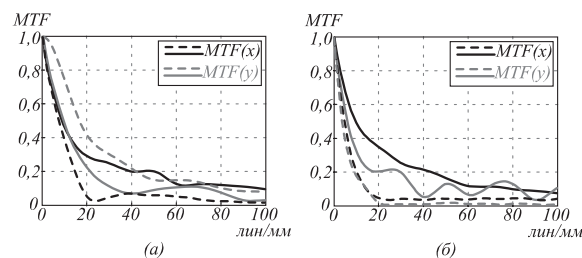


Рис. 9. ЧКХ соответствующие ФРТ на длинах волн 650 нм (а) и 750 нм (б). Сплошной линией показаны ЧКХ, полученные с учётом эйкональной функции на входной плоскости, пунктирной – без учёта

Значения ЧКХ на частоте 20 лин/мм в направлении дисперсии составляют 0,29 и 0,35 для длин волн 650 нм и 750 нм соответственно. В сагиттальном направлении – 0,22 и 0,20 соответственно. Для теоретической оценки передачи пространственных частот оптико-электронной системой обычно используется функция передачи модуляции (ФПМ), определяемая произведением ФПМ звеньев такой системы [58]. Показанная на рис. 1 оптическая схема спектральной линзы хорошо сочетается с формфактором объектива современного смартфона (длина оптической части $\sim 5 - 6$ мм), для которой характерное значение ЧКХ (или ФПМ) на частоте 20 лин/мм составляет более 0,9 [59]. В качестве регистратора можно выбрать фотоприёмник, например NOIL2SM1300A [60], для которого геометрическая ФПМ на рассматриваемой пространственной частоте составляет 0,88. Тогда суммарная теоретическая ФПМ на частоте 20 лин/мм в меридиональном направлении составляет 0,23 и 0,28 для длин волн 650 нм и 750 нм соответственно, а в сагиттальном 0,17 и 0,16 соответственно. Формируемое изображение в направлении полосы захвата с использованием выбранной фотоприёмной матрицы будет иметь приблизительно 140 пикселей. Проведённая оценка показывает, что компактная оптико-электронная система, основанная на данной спектральной линзе, способна передавать пространственные частоты на изображении объекта.

5. Обсуждение

В рамках настоящего исследования была изучена и продемонстрирована потенциальная возможность использования обычной двояковыпуклой линзы в качестве дисперсионного элемента, который формирует распределение освещённости в спектре первого порядка для выбранных длин волн. Общая длина оптической системы от апертурной (целевой) диафрагмы до монохромной матрицы составила 63 мм. Стоит отметить, что длина полосы захвата линзы (2 мм) совпала с полосой компактного спектрометра [23]. Формфактор данной линзы был получен с использованием инструментов трассировки и локальной оптимизации Zemax. Спектральное разделение было достигнуто за счёт использования

фазово-кодированной апертуры, расположенной в плоскости перед первой асферической поверхностью линзы и дифракционной решётки на второй поверхности линзы. Кодированная апертура вычислена с использованием моделирующей программы, написанной на языке программирования Python, и, основанной на математических соотношениях, полученных в настоящей работе. При этом, моделирование распространяющихся из предметной плоскости расходящихся сферических пучков проводилось на основе вычисления интегралов Кирхгофа. Расчёт спектрального разделения был проведён для двух длин волн 650 нм и 750 нм для получения изображения нормализованного дифференцированного вегетационного индекса NDVI [55], однако потенциально может быть выбрана другая комбинация каналов для задач [12–20] в диапазоне длин волн от 600 до 800 нм. Показано, что компактная оптико-электронная система, построенная на базе такой линзы, позволяет передавать пространственные частоты в изображении контрастных объектов. Полученная спектральная линза не отличается компактностью от известных современных схем дисперсионных датчиков [22–30] или датчиков на светофильтрах [31–41]. Однако видится, что её преимуществом является большая доступность, т.е. простота конструкции и низкая стоимость изготовления, как и [47, 48], что является ключевым фактором для использования такой линзы в интересах задач сельского хозяйства и точного земледелия. Конструктивным отличием данной системы от [46–49] является реализация спектрального разделения и фокусировки без использования дополнительной коллимирующей оптической системы. Следует отметить, что использование, разнесённых на разные поверхности кодированной апертуры и сферической дифракционной решётки позволяет для последней использовать технологию изготовления нарезной решётки [61], что потенциально может значительно повысить светосилу в узких каналах. Перспективой будущих исследований является рассмотрение некоторых из возможных ограничений в применении данной линзы, связанных с чувствительностью к технологическим погрешностям изготовления, температурными изменениями, рассеянием т.п. Также представляются интересными исследования возможности реализации фазово-кодированной апертуры на входной криволинейной поверхности линзы, увеличения поля зрения и числа узких спектральных каналов и т.п.

6. Заключение

В настоящей работе исследована возможность использования обычной собирающей линзы в качестве дисперсионного элемента, формирующего изображение на монохромной фотоприёмной матрице в узких спектральных каналах. Формфактор данной

линзы был получен с использованием Zemax, спектральное разделение в узкие каналы получено за счёт использования фазово-кодированной апертуры, расположенной в плоскости перед первой поверхностью и дифракционной решётки на второй поверхности линзы. Вычислена эйкональная функция для разделения излучения на длинах волн 650 нм и 750 нм. Расчётным методом показано, что компактная оптико-электронная система, построенная на основе такой спектральной линзы, способна передавать пространственные частоты на контрастном изображении предмета. Главным отличием спектральной линзы от известных миниатюрных спектральных систем является использование обычной собирающей линзы в качестве элемента осуществляющего спектральное разложение и формирование изображения на монохромной матрице.

Низкая стоимость изготовления, лёгкость, компактность и простота конструкции позволяют использовать спектральную линзу в качестве полезной нагрузки на борту большого числа БАС, например с целью решения мониторинговых задач в области точного земледелия и сельского хозяйства.

Перспективой будущих работ является исследование возможности реализации фазово-кодированной апертуры на входной криволинейной поверхности линзы, увеличения поля зрения и числа узких спектральных каналов линзы и т.д.

Благодарности

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2025-610.

References

- [1] Firsov N, Myasnikov E, Lobanov V, et al. HyperKAN: Kolmogorov–Arnold Networks Make Hyperspectral Image Classifiers Smarter. *Sensors*. 2024; 24(23): 7683. DOI: 10.3390/s24237683.
- [2] Makarov A, Mirpulatov I, Firsov N, et al. Deep Spectral-Spatial Transformer for Robust Hyperspectral Image Segmentation in Varying Field Conditions. *IEEE Access* 2025; 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3575699.
- [3] Samadzadegan F, Toosi A, Dadrass Javan F. A critical review on multi-sensor and multi-platform remote sensing data fusion approaches: current status and prospects. *International Journal of Remote Sensing*. 2024; 46(3). P. 1327–1402. DOI: 10.1080/01431161.2024.2429784.
- [4] Tejasree G, Agilandeewari L. An extensive review of hyperspectral image classification and prediction: techniques and challenges. *Multimed Tools Appl* 83; 2024. P. 80941–81038 (2024). DOI: 10.1007/s11042-024-18562-9.
- [5] Lukyanov OE, Hoang VH, Komarov VA, et al. Quijada Pioquinto JG, Chertykovtseva VO. Reducing energy consumption of vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle using hybrid technical solutions. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024; V. 23(1). P. 38-54. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-38-54.

- [6] Novikov I, Makarov A, Pirogov A, et al. Analysis of Hyperspectral Images of River Waters. *Opt. Mem. Neural Networks* 2024; 33 (Suppl 2), 386–397. DOI: 10.3103/S1060992X24700668.
- [7] Yue J, Yang G, Li C, et al. Estimation of Winter Wheat Above-Ground Biomass Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Snapshot Hyperspectral Sensor and Crop Height Improved Models. *Remote Sensing*. 2017; 9(7): 708. DOI: 10.3390/rs9070708.
- [8] Zhao H, Yang C, Guo W, Zhang L, Zhang D. Automatic Estimation of Crop Disease Severity Levels Based on Vegetation Index Normalization. *Remote Sensing* 2020; 12(12): 1930. DOI: 10.3390/rs12121930.
- [9] Billy G. Ram, Peter Oduor, et al. A systematic review of hyperspectral imaging in precision agriculture: Analysis of its current state and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024; 222, 109037. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109037.
- [10] Yutaka K, Kenji I, A dual-spectral camera system for paddy rice seedling row detection. *Computers and Electronics in Agriculture* 2008; 63(1): 49-56. DOI: 10.1016/j.compag.2008.01.012.
- [11] Andrés M, Gerardo F. The AgriQ: A low-cost unmanned aerial system for precision agriculture. *Expert Systems with Applications* 2021; 115163: DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115163.
- [12] Gong Y, Duan B, Fang S. et al. Remote estimation of rapeseed yield with unmanned aerial vehicle (UAV) imaging and spectral mixture analysis. *Plant Methods*. 2018; 14(70): DOI:10.1186/s13007-018-0338-z.
- [13] Zhou X, Zheng H, Xu X, et al. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017; 130: 246-255, DOI:10.1016/j.isprsjprs.2017.05.003.
- [14] Du M, Noguchi N. Monitoring of Wheat Growth Status and Mapping of Wheat Yield's within-Field Spatial Variations Using Color Images Acquired from UAV-camera System. *Remote Sensing*. 2017; 9(3):289. DOI:10.3390/rs9030289.
- [15] Peng Y, Nguy-Robertson A, Arkebauer T, Gitelson AA. Assessment of Canopy Chlorophyll Content Retrieval in Maize and Soybean: Implications of Hysteresis on the Development of Generic Algorithms. *Remote Sensing*. 2017; 9(3):226. DOI:10.3390/rs9030226.
- [16] Manal E, Andres M, Alfonso F, et al. Estimating chlorophyll with thermal and broadband multispectral high resolution imagery from an unmanned aerial system using relevance vector machines for precision agriculture. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015; 43: 32-42. DOI:10.1016/j.jag.2015.03.017.
- [17] Filella I, Serrano L, Serra J, Peñuelas J. Evaluating Wheat Nitrogen Status with Canopy Reflectance Indices and Discriminant Analysis. *Crop Science*, 1995; 35: 1400-1405. DOI:10.2135/cropsci1995.0011183X003500050023x.
- [18] Cao X, Luo Y, Zhou Y, et al. Detection of powdery mildew in two winter wheat plant densities and prediction of grain yield using canopy hyperspectral reflectance. *PLoS One*. 2015;10(3): e0121462. DOI: 10.1371/journal.pone.0121462.
- [19] Rayapati N, Perry E. et al. The potential of spectral reflectance technique for the detection of Grapevine leafroll-associated virus-3 in two red-berried wine grape cultivars. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009; 66: 38-45. DOI: 10.1016/j.compag.2008.11.007.
- [20] Zhao H, Yang C, Guo W, Zhang L, Zhang D. Automatic Estimation of Crop Disease Severity Levels Based on Vegetation Index Normalization. *Remote Sensing*. 2020; 12(12):1930. DOI: 10.3390/rs12121930.
- [21] Source: < <https://innoter.com/articles/giperspektralnaya-semka/>>.
- [22] Kwa T, Wolffenbuttel R. Integrated grating/detector array fabricated in silicon using micromachining techniques. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1992; 31(1–3): 259-266. DOI:10.1016/0924-4247(92)80114-I.
- [23] Source: < <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/spectrometers/mini-spectrometer/C12666MA.html> >.
- [24] Edwards P, Zhang C, Zhang B. et al. Smartphone based optical spectrometer for diffusive reflectance spectroscopic measurement of hemoglobin. *Sci Rep*, 2017; 7: 12224. DOI: 10.1038/s41598-017-12482-5.
- [25] Don S, White PL, Anheier NC. Miniaturized spectrometer employing planar waveguides and grating couplers for chemical analysis. *Appl. Opt.* 1990; 29(31): 4583-4589. DOI: 10.1364/AO.29.004583.
- [26] Dietmar S, Jörg M. Selffocussing phase transmission grating for an integrated optical microspectrometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001; 88(1): 1-9. DOI:10.1016/S0924-4247(00)00499-4.
- [27] Boshen G, Zhimin S, Robert WB. Design of flat-band superprism structures for on-chip spectroscopy. *Opt. Express*, 2015; 23(5): 6491-6496. DOI: 10.1364/OE.23.006491.
- [28] Calafiore G, Koshelev A, Dhuey S. et al. Holographic planar lightwave circuit for on-chip spectroscopy. *Light Sci Appl*, 2014; 3: e203. DOI: 10.1038/lsa.2014.84.
- [29] He J, Lamontagne B, Delage A, et al. Monolithic integrated wavelength demultiplexer based on a waveguide Rowland circle grating in InGaAsP/InP. *Journal of Lightwave Technology*, 1998; 16(4): 631-638. DOI: 10.1109/50.664075.
- [30] Cheben P, Schmid JH, Delàge A, et al. A high-resolution silicon-on-insulator arrayed waveguide grating microspectrometer with sub-micrometer aperture waveguides. *Opt. Express*, 2007; 15(5): 2299-2306. DOI: 10.1364/OE.15.002299.
- [31] Zhang H, Wang XL, Soos JI, Crisp JA. Design of a miniature solid state NIR spectrometer. *Proc. SPIE* 2475, *Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy*, 1995; DOI: 10.1117/12.211276.
- [32] Gat N. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review. *Proc. SPIE* 4056, 2000; DOI: 10.1117/12.381686.
- [33] Carmo JP, Rocha RP, Bartek M, et al. A review of visible-range Fabry–Perot microspectrometers in silicon for the industry. *Optics & Laser Technology*, 2012; 44(7): 2312-2320. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.03.036.
- [34] Kong SH, Correia JH, Graaf G, et al. Integrated silicon microspectrometers. in *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2001; 4(3): 34-38. DOI: 10.1109/5289.953457.
- [35] Wang SW, Xia C, Chen X, et al. Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array. *Opt. Lett.* 2007; 32(6): 632-634. DOI: 10.1364/OL.32.000632.
- [36] Pervez NK, Cheng W, Jia Z, et al. Photonic crystal spectrometer. *Opt. Express*, 2010; 18(8): 8277-8285. DOI: 10.1364/OE.18.008277.
- [37] Andreas Tittl et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces. *Science*, 2018; 360(6393): 1105-1109. DOI:10.1126/science.aas9768.
- [38] Mika AM, Linear-wedge spectrometer. *Proc. SPIE* 1298, *Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment*, 1990; DOI:10.1117/12.21343.

- [39] Grundmann M Modeling of a Waveguide-Based UV–VIS–IR Spectrometer Based on a Lateral (In,Ga)N Alloy Gradient. *Phys. Status Solidi A*, 2019; 216: 1900170. DOI: 10.1002/pssa.201900170.
- [40] Wallrabe U, Solf C, Mohr J, Korvink JG. Miniaturized Fourier Transform Spectrometer for the near infrared wavelength regime incorporating an electromagnetic linear actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005; 123–124: 459-467. DOI: 10.1016/j.sna.2005.05.014.
- [41] Velasco AV, Cheben P, Bock PJ, et al. High-resolution Fourier-transform spectrometer chip with microphotonic silicon spiral waveguides. *Opt. Lett.*, 2013; 38(5): 706-708. DOI: 10.1364/OL.38.000706.
- [42] Frey L, Parrein P, Raby J, et al. Color filters including infrared cut-off integrated on CMOS image sensor. *Opt. Express*, 2011; 19(14): 13073-13080. DOI: 10.1364/OE.19.013073.
- [43] Wang P, Menon R. Ultra-high-sensitivity color imaging via a transparent diffractive-filter array and computational optics. *Optica*, 2015; 2(11): 933-939. DOI: 10.1364/OPTICA.2.000933.
- [44] Arguello H, Pinilla S, Peng Y, et al. Shift-variant color-coded diffractive spectral imaging system. *Optica*, 2021; 8(11): 1424-1434. DOI: 10.1364/OPTICA.439142.
- [45] Peng Y, Fu Q, Amata H, et al. Computational imaging using lightweight diffractive-refractive optics. *Opt. Express*, 2015; 23(24): 31393-31407. DOI: 10.1364/OE.23.031393.
- [46] Doskolovich LL, Skidanov RV, Bezus EA, et al. Design of diffractive lenses operating at several wavelengths. *Opt. Express*, 2020; 28(8): 11705-11720. DOI: 10.1364/OE.389458.
- [47] Blank VA, Skidanov RV, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Spectral Diffractive Lenses for Measuring a Modified Red Edge Simple Ratio Index and a Water Band Index. *Sensors* 2021; 21, 7694. DOI: 10.3390/s21227694.
- [48] Blank VA, Skidanov RV, Doskolovich LL. Investigation of a spectral lens for the formation of a normalized difference vegetation index ndvi 0.705. *Journal of Optical Technology* 2022; 89(3): 137-141. DOI: 10.1364/JOT.89.000137.
- [49] Hamza MM, Blank VA, Podlipnov VV, Doskolovich LL, Skidanov RV, Fan B. Spectral lenses to highlight blood vessels in the skin. *Computer Optics* 2022; 46(6): 899-904. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1155.
- [50] Ezhov EG. Design of optical systems with diffraction elements on aspheric surfaces. *Computer Optics* 2006; 30: 9-15.
- [51] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Karsakov AV, Khonina SN. Modeling action of a hyperspectrometer based on the Offner scheme within geometric optics. *Computer Optics* 2014; 38(2): 271-280. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-2-271-280.
- [52] Kharitonov SI, Kazanskiy NL, Doskolovich LL, Strelkov YS. Modeling the reflection of the electromagnetic waves at a diffraction grating generated on a curved surface. *Computer Optics* 2016; 40(2): 194-202. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-194-202.
- [53] Soshnikov DV, Doskolovich LL, Byzov EV. Gradient method for designing cascaded DOEs and its application in the problem of classifying handwritten digits. *Computer Optics* 2023; 47(5): 691-701. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1314.
- [54] Kingma D, Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. *International Conference on Learning Representations*. Source: < <https://papers.baulab.info/papers/Kingma-2015.pdf>>.
- [55] Metternicht G. Vegetation indices derived from high-resolution airborne videography for precision crop management. *Int. J. Remote Sens* 2003; 24. DOI: 10.1080/01431160210163074.
- [56] Slyusarev GG. *Methods of calculating optical systems* [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie", 1969.
- [57] Schroeder G, Traiber H. *Technical optics: translated from germ. Ilinsky RE* [In Russian]. Moscow: "Technosphere", 2006.
- [58] Volosov DS «Photographic optics (theory, design basics, optical characteristics)», 2nd revised edition [In Russian]. Moscow: "Iskusstvo", 1978.
- [59] Blahnik V, Schindelbeck O. Smartphone imaging technology and its applications. *Advanced Optical Technologies*, 2021; 10(3): 145-232. DOI: 10.1515/aot-2021-0023.
- [60] Source: < <https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/noil2sm1300a-d.pdf>>.
- [61] Znamenskii MY, Lukashevich YK, Skochilov AF, Fedulova NA. Transmissive ruled diffraction gratings for the UV, visible, and IR regions. *Journal of Optical Technology* 2014; 81(3): 151-153. DOI: 10.1364/JOT.81.000151.

Сведения об авторах

Расторгуев Андрей Алексеевич, 1984 г. рождения, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер Центра «Интеллектуальная мобильность многофункциональных беспилотных авиационных систем» Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. В 2006 году окончил физический факультет Самарского государственного университета по специальности «Оптика», в 2023 г. защитил кандидатскую диссертацию. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, моделирование работы оптических систем, дифракционная оптика. E-mail: goto.anras@gmail.com

Харитонов Сергей Иванович, 1961 г. рождения, доктор физико-математических наук, доцент кафедры наноинженерии, ведущий научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики Отделения «Институт систем обработки изображений – Самара» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». В 1984 г. окончил физический факультет Самарского государственного университета, в 1993 г. защитил кандидатскую, в 2010 г. – докторскую диссертацию. Область научных интересов: дифракционная, квантовая оптика, волноводная оптика. E-mail: prognoz2007@gmail.com

Казанский Николай Львович в 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996), профессор, работает руководителем Отделения «Институт систем обработки изображений – Самара» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники федерального государственного бюджетного

учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Является членом международных научных обществ OSA, SPIE и IAPR. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 380 статей, 14 монографий, 57 авторских свидетельств и патентов. Область научных интересов: дифракционная оптика, математическое моделирование, обработка изображений и нанофотоника.

Сайт: <http://www.ipsiras.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: kazanskiy@ssau.ru

Никоноров Артём Владимирович, 1979 года рождения. В 2005 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет. Доктор технических наук (2016). В настоящее время работает профессором кафедры суперкомпьютеров и вычислительной техники Самарского университета, ведущим научным сотрудником в лаборатории интеллектуального анализа видеоданных Отделения «Институт систем обработки изображений – Самара» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Опубликовал более 90 работ, две монографии. Область научных интересов: распознавание образов и анализ изображений, системная идентификация, параллельное и распределенное программирование, программирование GPGPU.

E-mail: artniko@gmail.com

Поступила в редакцию 15 августа 2025 г. Окончательный вариант – 24 октября 2025 г.

Calculation of the spectral lens to obtain a normalized vegetation index

A.A. Rastorguev¹, S.I. Kharitonov^{1,2}, N.L. Kazanskiy^{1,2}, A.V. Nikonorov^{1,2}

¹Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34;

²Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute",
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151

Abstract

A new dispersive optical system concept is proposed for image formation in narrow spectral channels. This optical system is based on a conventional converging lens combined with a coded aperture and a diffraction grating. A gradient calculation method was developed, and the phase function at the lens's input aperture was calculated to separate wavelengths of 650 nm and 750 nm. The calculation method demonstrated the optical system's ability to transmit spatial frequencies in a high-contrast image of an object. Compared to existing compact spectral systems, the proposed spectral lens is inexpensive and easy to manufacture, making it suitable for various precision agriculture applications.

Keywords: spectral lens, gradient method, wave optics, diffractive optical element.

Citation: Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL, Nikonorov AV. Calculation of the spectral lens to obtain a normalized vegetation index. *Computer Optics* 2025; 49(6): 961-971. DOI: 10.18287/COJ1806.

Acknowledgements: This work was supported by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation, grant No 075-15-2025-610.

About authors

Rastorguev Andrey Alekseevich, born in 1984, candidate of physical and mathematical sciences, leading engineer of the Center for Intelligent Mobility of Multifunctional Unmanned Aircraft Systems of the Samara National Research University named after academician S.P. Korolev. In 2006, he graduated from the Physics Department of Samara State University, specializing in Optics, and defended his candidate dissertation in 2023. Research interests: remote sensing of the Earth, modeling of optical systems, diffractive optics. E-mail: goto.anras@gmail.com

Sergey Ivanovich Kharitonov (b. 1961) leading researcher of Diffractive Optics laboratory in the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". Doctor of Physical and Mathematical Sciences. 1984 – graduated from Physics department of Samara State University (presently, Samara National Research University); 1993 – defended his candidate dissertation; 2010 – defended his doctoral thesis. Research interests: diffraction, quantum optics, waveguide optics. The list of S.I. Kharitonov scientific papers includes 87 articles, 5 patents. E-mail: prognoz2007@gmail.com

Nikolay Lvovich Kazanskiy, ScD, graduated with honors (1981) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics. He is the Head of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics department of Samara University, holding the chair at the of High-Performance Computing department at Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". He is a member of OSA, SPIE and IAPR. He coauthored 380 scientific papers, 14 monographs, 57 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. Website: <http://www.ipsiras.ru/staff/kazanskiy.htm> E-mail: kazanskiy@ssau.ru

Artem Vladimirovich Nikonorov, (b. 1979), ScD, graduated from SSAU in 2002. Currently he works as a professor of Supercomputers and Computer Engineering department of Samara University, a leading researcher at the Laboratory of Intelligent Analysis of Video Data at the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". Has over 90 publications, two monographs. Research interests: pattern recognition and image analysis, system identification, parallel and distributed programming, GPGPU programming. E-mail: artniko@gmail.com

Received August 15, 2025. The final version – October 24, 2025.
