

ПРИЕМНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАНАЛ ЛАЗЕРНОГО ЛОКАТОРА С ФУНКЦИЕЙ ДАЛЬНОМЕРА И СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА

А.А. Аникьев¹

anastas@bmstu.ru

Н.В. Барышников¹

baryshnikov@bmstu.ru

С.В. Якубовский²

yakubovskiy@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ПАО КМЗ, г. Красногорск, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена возможность создания оптической схемы приемного канала лазерного лоатора, работающего в широком спектральном диапазоне с высоким разрешением. В целях минимизации влияния хроматических aberrаций и aberrаций других типов на качество изображения выбрана модификация зеркальной системы Грегори — схема Корша с асферическими главным, вторичным и третьим зеркалами, обеспечивающая высокие оптические показатели в широком спектральном диапазоне. Приведены расчеты конструктивных параметров и оптических характеристик. Выполнена оценка качества изображения, соответствующего поставленной задаче, — получить размеры пятна рассеяния в плоскости изображения, близкие к дифракционному пределу. Оптимизация полученной оптической схемы позволила существенно уменьшить значения ее основных aberrаций — кривизны поля и дисторсии. Высокое качество изображения и оптические характеристики полученной оптической схемы позволяют расширить функции лазерного лоатора для оценки температуры факела летательных аппаратов методом анализа стоксовой и антистоксовой компонент излучения, рассеянного от пламени, в спектральных диапазонах колебательных переходов основных углеводородов, содержащихся в авиационном топливе. Полученные значения температуры являются дополнительными параметрами идентификации объекта при его обнаружении бортовым лазерным лоатором

Ключевые слова

Схема Корша, лазерный лоатор, габаритные размеры, пятно рассеяния, метод комбинационного рассеяния света, идентификация

Поступила 22.04.2024

Принята 21.04.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. При существующих недостатках лазерных локаторов развитие их возможностей в системах слежения, сканирования, обнаружения и распознавания объектов продолжается в отношении точности определения статических и динамических характеристик объекта и увеличения расстояния до объекта обнаружения. Недостатки оптической локализации отчасти можно скомпенсировать богатой функциональностью оптико-электронных систем (ОЭС), используемой пока недостаточно. Одним из наиболее важных узлов ОЭС в качестве приема и последующей обработки сигнала является приемная оптическая система (ПрОС), основу которой составляет оптическая схема приемного устройства. Выбор оптической схемы и связанная с ней структура приемного тракта задаются в соответствии с различными факторами: назначением ОЭС, задачами, которые она призвана решать, условиями работы, требованиями к точности, набором функций, габаритными размерами и др. В зависимости от набора факторов оптическая схема может быть построена с разделенными или совмещенными каналами приема и передачи. Совмещенные каналы расположены на одной оптической оси и имеют существенный недостаток — засветку фотоприемника излучением лазерного генератора, рассеянным на собственных элементах. Этот недостаток устраняет преимущество компактности построения, однако для задач, не требующих большой точности определения характеристик, такая схема вполне может применяться.

Тем не менее в борьбе за точность определения характеристик объекта выигрывает оптическая схема с разделенными каналами и источниками излучения (ИИ). Если она основана на зеркальной или зеркально-линзовой оптической системе, то такая оптическая схема с разделенными каналами освобождается от центрального экранирования ввиду внеосевого расположения ИИ.

В настоящей работе рассмотрена оптическая схема приемного канала лазерного локатора, позволяющая формировать оптическое изображение объекта с качеством, близким к дифракционному пределу, а также система преобразования сигнала, позволяющая с помощью спектральных методов измерять дальность, угловые координаты, скорость и температуру объекта с точностью тепловизионных каналов.

Постановка задачи. Оптическая схема приемного канала лазерного бортового локатора состоит из оптических фильтров, принимающих в определенном спектральном диапазоне лазерное излучение, отраженное от удаленного объекта, из объектива, преобразующего прошедшее через фильтр излучение в изображение предмета и разводящего сфокусиро-

ванное излучение по двум спектральным каналам, из приемников излучений (ПИ), регистрирующих полученное изображение в спектральном канале.

Принцип работы ПрОС следующий. Излучение от узконаправленного лазерного источника падает на удаленный исследуемый объект, отражается от него и проходит через оптические фильтры, прозрачные в указанном спектральном диапазоне. Затем оно попадает в объектив, который формирует в каждом спектральном канале конечное изображение исследуемого объекта, после чего эти изображения регистрируют ПИ, чувствительные в данном спектральном диапазоне. Таким образом, в ПрОС предметом на конечном расстоянии является оптический фильтр, а предметом на бесконечном расстоянии — удаленный исследуемый объект, который отражает узконаправленное лазерное излучение.

Технические требования к оптической схеме приемного канала лазерного бортового локатора при условии ее размещения на плате размером $40 \times 50 \text{ см}^2$ (для компактности) следующие:

- максимальный диаметр главного зеркала не более 200 мм;
- относительное отверстие не менее 1 : 10;
- вынос изображения за вершину главного зеркала не более чем на 40 % продольной длины оптической системы;
- продольная длина оптической схемы не более 400 мм;
- расстояние от главного зеркала до предметной плоскости не более 250 мм;
- вынос предметной плоскости за вторичное зеркало не более 10 мм;
- диаметр абберрационного пятна рассеяния не более 4 мкм;
- дальность обнаружения 0,1...25 км;
- рабочие спектральные диапазоны 0,4...0,6 или 8...12 мкм;
- приемник излучения — это фоторезистор CdS (300 К, размер пикселя не более 13 мкм) и фотодиод $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$ (термоэлектрический холодильник 77 К, размер пикселя не более 25 мкм);
- линейное поле в пространстве предметов не более 90 мм;
- заднее фокусное расстояние объектива не более 100 мм;
- длина волны генерации лазера на CO_2 $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$;
- длина волны генерации лазера на Nd:YAG/Nd:Glass $\lambda = 1,064 \text{ мкм}$ с удвоением частоты (doubled) 0,532 мкм.

В случае размещения локатора на борту воздушного судна должны быть предусмотрены дополнительные функции регистрации угловых координат объекта, дальности и радиальной скорости, а также реперные

линии состава пламени факела работающего двигателя воздушного или наземного объекта в блоке распознавания и идентификации объекта.

Результаты и обсуждение. *Расчет объектива приемного канала.* В лазерных локационных системах в качестве оптической схемы приемного канала наиболее часто применяются зеркальные и зеркально-линзовые телескопические системы Кассегрена, Грегори и Ньютона [1]. Преимущество схем телескопов Кассегрена и Грегори по сравнению со схемой телескопа Ньютона заключается в осесимметричном (центрированном) расположении оптических компонентов (вдоль единой оптической оси), что упрощает сборку и юстировку. При этом схема телескопа Грегори имеет важное преимущество перед схемой телескопа Кассегрена: поверхность вторичного асферического зеркала в схеме телескопа Грегори является вогнутой, ее контроль и изготовление значительно проще, чем у выпуклого вторичного зеркала в схеме телескопа Кассегрена. Модификацией схемы телескопа Грегори является схема телескопа Корша, отличающаяся добавлением третьего асферического зеркала в целях получения дополнительного параметра для коррекции изображения, что, как следствие, повышает его качество [2]. В настоящей работе выбрана и рассмотрена модификация оптической системы типа схемы телескопа Грегори, а именно схема телескопа Корша — трехзеркальная ОЭС с асферическими зеркалами второго порядка (главное и вторичное зеркала выполнены в форме сплюснутого сфероида, третье — в форме эллипсоида). Отличительной особенностью построения оптической системы типа схемы Корша является одновременный прием отраженного (рассеянного) излучения в двух спектральных диапазонах и соответственно возможность выноса двух ветвей изображения за главное зеркало на фотоприемники излучения двух спектральных диапазонов (за счет третьего зеркала и двух компоновочных зеркал для каждой ветви).

Результат габаритного расчета комбинированной схемы Грегори (схемы Корша) с выносом двух ветвей на ПИ приведен на рис. 1. Расчет ОЭС выполнен в три этапа: первый этап — габаритный расчет, второй — построение хода лучей двух ветвей и расчет aberrаций, третий — оптимизация полученной ОЭС.

Оптические фильтры (ОФ) представляют собой плоскопараллельные пластинки незначительной толщины (5 мм), т. е. это элементы с нулевой оптической силой, поэтому их влияние на ход лучей и качество изображения ОЭС можно не учитывать. Плоскость входного зрачка является мнимой и расположена в вершине вторичного зеркала, поэтому нумерация поверхностей зеркал начинается с вершины главного зеркала.

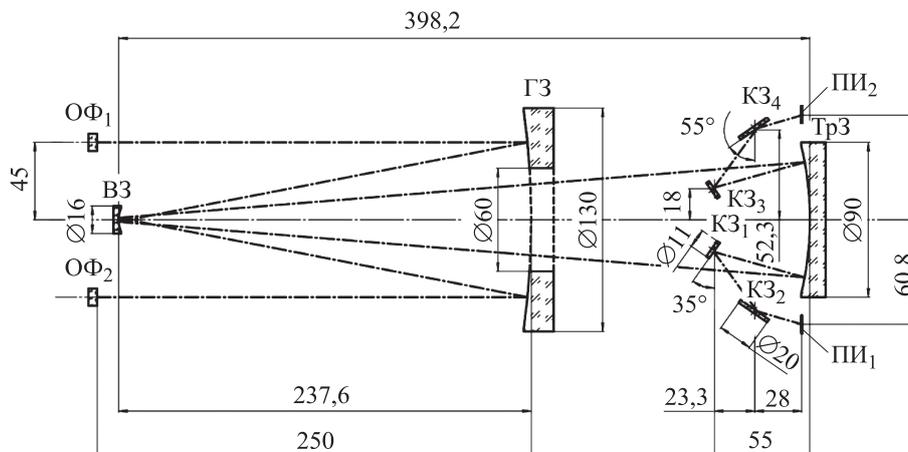


Рис. 1. Результат габаритного расчета комбинированной схемы Грегори (схемы Корша):

ПИ₁, ПИ₂ — ПИ первой и второй ветвей оптической системы; ГЗ, ТрЗ, КЗ — главное, третье, компоновочное зеркала соответственно

Система рассчитана под заднее фокусное расстояние $f' = -70$ мм, которое является отрицательным, что характерно для такой системы. Для габаритного расчета с учетом правила знаков введем обозначения, приведенные на рис. 2.

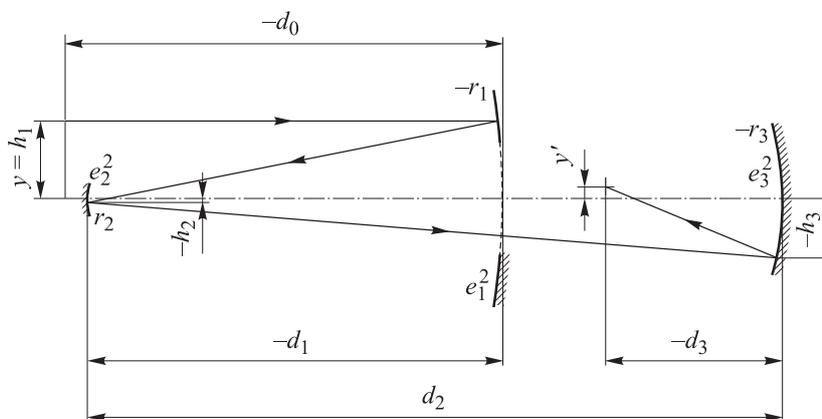


Рис. 2. Пояснения к габаритному расчету:

$r_1 - r_3$ — радиусы кривизны зеркальных поверхностей; $d_0 - d_3$ — осевые расстояния; $e_1^2 - e_3^2$ — квадраты эксцентриситетов асферических поверхностей зеркал; $h_1 - h_3$ — высоты падения первого вспомогательного луча; y — высота «предмета» (высота падения луча на главное зеркало); y' — высота «изображения» (высота первого вспомогательного луча на выходе из системы)

Исходя из технических требований, соотношение осевых расстояний можно записать так:

$$-d_0 + d_1 + d_2 = 410 \text{ мм}, \quad (1)$$

где $d_0 = -250$ мм, $d_2 = 400$ мм; тогда расстояние $d_1 = -240$ мм.

Для минимизации продольного габаритного размера системы и по технологическим соображениям введем дополнительное ограничение

$$0 < \delta = |r_1| - 2|d_1| < 1 \text{ мм}, \quad (2)$$

где, например, $\delta = 0,8$ мм. Из (2) получаем

$$r_1 = 2d_1 - \delta. \quad (3)$$

После подстановки в (3) рассчитаем $r_1 = -480,8$ мм.

На первом этапе синтеза схемы (без учета плоских компоновочных зеркал, которые не влияют на фокусное расстояние и, следовательно, не участвуют в габаритном и абберационном расчетах) ограничимся условием, не противоречащим техническим требованиям, а именно: вынос плоскости изображения за вершину главного зеркала будет составлять не более 10 % продольной длины: $d_2 - |d_1| - |d_3| \leq 0,1d_2$. Отсюда

$$|d_1| + |d_3| = 0,9d_2. \quad (4)$$

С учетом правила знаков из (4) определяем расстояние $d_3 = -120$ мм.

В соответствии с [2] для расчета радиусов r_2 и r_3 поверхностей зеркал введем следующие обозначения:

$$q_I = \frac{-\delta}{r_1} = 0,001664; \quad q_{II} = \frac{d_3}{f'} = 1,714286; \quad (5)$$

$$\beta_I = \frac{r_1}{2\beta_{II}f'} = 1,031286; \quad \beta_{II} = \frac{-d_2}{f'(q_I + q_{II})} = 3,330101.$$

Радиусы вторичной и третьей зеркальных поверхностей с учетом (5) определяются как

$$r_2 = 2 \frac{r_1 q_I}{1 - \beta_I} = 25,571 \text{ мм}; \quad (6)$$

$$r_3 = \frac{r_1 q_{II}}{\beta_I(1 + \beta_{II})} = -184,574 \text{ мм}. \quad (7)$$

Проверку габаритного расчета по (1)–(7) можно выполнить на основе соотношения для оптической силы Φ объектива, являющейся обратной величиной к фокусному расстоянию f' :

$$\Phi = 2 \left\{ \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{2d_2}{r_2 r_3} - \frac{1}{r_1} \left[2d_1 \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{2d_2}{r_2 r_3} \right) + \frac{2d_2}{r_3} + 1 \right] \right\} =$$

$$= -0,014286 \text{ мм}^{-1}. \quad (8)$$

Из выражения (8) определяем требуемое фокусное расстояние $f' = 1/\Phi = -70$ мм.

Квадраты эксцентриситетов e_1^2, e_2^2, e_3^2 асферических поверхностей зеркал запишем так:

$$e_1^2 = -\left(1 + \frac{r_1}{d_0}\right)^2 = -8,55; \quad (9)$$

$$e_2^2 = -\left(1 - \frac{r_2}{d_1}\right)^2 = -1,22; \quad (10)$$

$$e_3^2 = \left(1 - \frac{r_3}{d_3}\right)^2 = 0,25. \quad (11)$$

Рассчитанные по (1)–(11) значения конструктивных параметров можно уточнять при оптимизации ОЭС.

Аберрационный расчет будем проводить в области аберраций третьего порядка в приведенной классической нормировке [3]. Еще одним преимуществом указанной схемы является то, что она полностью зеркальная, следовательно, свободна от хроматических аберраций. Поэтому рассчитываем только первые пять сумм Зейделя ($S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$), с целью оценить ассоциируемые с ними монохроматические аберрации: сферическую, кому, астигматизм, кривизну поля и дисторсию [4]. Для этого предварительно вычислим оптические силы Φ_1, Φ_2, Φ_3 каждого зеркала объектива:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{-2}{r_1} = 0,00416 \text{ мм}^{-1}; \\ \Phi_2 &= \frac{2}{r_2} = 0,078214 \text{ мм}^{-1}; \\ \Phi_3 &= \frac{-2}{r_3} = 0,010836 \text{ мм}^{-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для приведенной нормировки выберем следующие начальные параметры схемы: высота пересечения первого вспомогательного луча с поверхностью первого (главного) зеркала $h_1 = y/f' = -0,642857$; угол падения первого вспомогательного луча на поверхность главного зеркала $\alpha_1 = 0,008685$; высота пересечения второго вспомогательного луча с поверхностью главного зеркала $H_1 = d_1/f' = 3,428571$; угол падения второго вспомогательного луча на первую поверхность $\beta_1 = 1$; инвариант Гюйгенса — Геймгольца $I = -1$. С учетом этого и рассчитанных по (12) оптических сил определим остальные параметры первого и второго

вспомогательных лучей для поверхностей вторичного и третьего зеркал, в том числе параметры после отражения от третьего зеркала, т. е. на выходе из системы $(\alpha_4, h_4, \beta_4, H_4)$:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= -\alpha_1 - h_1\Phi_1 f' = -0,195873; & h_2 &= h_1 - d_1\alpha_2/f' = 0,028708; \\ \beta_2 &= -\beta_1 - H_1\Phi_1 f' = -0,001664; & H_2 &= H_1 - d_1\beta_2/f' = 3,434276; \\ \alpha_3 &= -\alpha_2 + h_2\Phi_2 f' = 0,038699; & h_3 &= h_2 - d_2\alpha_3/f' = 0,249847; \\ \beta_3 &= -\beta_2 + H_2\Phi_2 f' = -18,800998; & H_3 &= H_2 - d_2\beta_3/f' = -104; \\ \alpha_4 &= -\alpha_3 - h_3\Phi_3 f' = 0,150811; & h_4 &= h_3 - d_3\alpha_4/f' = -0,015512; \\ \beta_4 &= -\beta_3 - H_3\Phi_3 f' = -60,083333; & H_4 &= H_3 - d_3\beta_4/f' = 1,720058. \end{aligned} \quad (13)$$

Аналогично (13) рассчитаем абберрационные параметры P_1, P_2, P_3 для каждой зеркальной поверхности:

$$\begin{aligned} P_1 &= [-1/2(\alpha_2 - \alpha_1)]^2 (-\alpha_2 - \alpha_1) = 0,00195817; \\ P_2 &= [1/2(\alpha_3 - \alpha_2)]^2 (\alpha_3 + \alpha_2) = -0,00216209; \\ P_3 &= [-1/2(\alpha_4 - \alpha_3)]^2 (-\alpha_4 - \alpha_3) = -0,00059548. \end{aligned} \quad (14)$$

С учетом (13) и (14) получаем расчетные значения первых пяти сумм Зейделя:

$$\begin{aligned} S_I &= h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_3 P_3 = -0,0014697; \\ S_{II} &= h_1 P_1 \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right) + h_2 P_2 \left(\frac{\beta_3 - \beta_2}{\alpha_3 - \alpha_2} \right) + h_3 P_3 \left(\frac{\beta_4 - \beta_3}{\alpha_4 - \alpha_3} \right) = 0,053595; \\ S_{III} &= h_1 P_1 \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right)^2 + h_2 P_2 \left(\frac{\beta_3 - \beta_2}{\alpha_3 - \alpha_2} \right)^2 + h_3 P_3 \left(\frac{\beta_4 - \beta_3}{\alpha_4 - \alpha_3} \right)^2 = -20,602067; \\ S_{IV} &= (-\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3) f' = 6,524685; \\ S_V &= \left[h_1 P_1 \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right)^2 - I^2 \Phi_1 f' \right] \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right) + \\ &+ \left[h_2 P_2 \left(\frac{\beta_3 - \beta_2}{\alpha_3 - \alpha_2} \right)^2 - I^2 \Phi_2 f' \right] \left(\frac{\beta_3 - \beta_2}{\alpha_3 - \alpha_2} \right) + \\ &+ \left[h_3 P_3 \left(\frac{\beta_4 - \beta_3}{\alpha_4 - \alpha_3} \right)^2 - I^2 \Phi_3 f' \right] \left(\frac{\beta_4 - \beta_3}{\alpha_4 - \alpha_3} \right) = 6743,47361. \end{aligned} \quad (15)$$

Согласно приведенным оценкам (15), среди имеющихся у системы абберраций наибольшее влияние на качество изображения оказывает дисторсия, далее астигматизм и кривизна поля. Следовательно, дальнейшую оптимизацию, направленную на исправление этих абберраций, будем

проводить в программе для оптического проектирования Zemax¹. Перед этим в целях сравнения исходных параметров системы с параметрами после оптимизации приведем значения реальных аберраций, рассчитанных в программе Zemax. Важно уточнить, что, поскольку оптическая схема свободна от хроматических аберраций, значения реальных аберраций будут одинаковы для любой длины волны (не зависят от длины волны).

Значения реальных аберраций

Продольная сферическая, мм	1,162
Меридиональная кома, мм	0,0011
Астигматизм (астигматическая разность), мм	0,1674
Кривизна поля (средняя кривизна поля), мм	1,0228
Дисторсия, %	2737,3685

Отметим, что среди реальных аберраций, кроме перечисленных, также сильно проявляется на фоне остальных и сферическая, что можно объяснить влиянием ее высших порядков на оптическую схему. Данную аберрацию также необходимо исправить.

На каждой ветви необходимо расположить по два плоских компоновочных (ломающих) зеркала (КЗ₁–КЗ₄), которые не влияют на аберрации системы, но позволяют развести по двум соответствующим каналам лучи, идущие от разных ИИ. При этом наклон компоновочных зеркал должен быть таким, чтобы плоскость получаемого изображения была перпендикулярна оптической оси объектива. Это достигается наклоном зеркал на углы 35° и 55° по отношению к оптической оси (см. рис. 1).

Результат синтеза и оптимизации в виде полученных конструктивных параметров оптической схемы приведен в табл. 1 для одного канала (первой ветви).

Таблица 1

Конструктивные параметры оптической схемы

Радиус, мм	Толщина, мм	Поверхность оптического компонента	Диаметр, мм	Квадрат эксцентриситета	Смещение по оси Y, мм	Поворот относительно оси X, град
∞	5	Стекло К8 [*]	10	–	45 ^{**}	–
∞	250	Воздух	90	–	45 ^{**}	–
–476	–237,6	Зеркало	100	–4,3	–	–

¹ Zemax 13. Optical design program User's Manual. Zemax LLC, 2014.

Радиус, мм	Толщина, мм	Поверхность оптического компонента	Диаметр, мм	Квадрат эксцентриситета	Смещение по оси Y, мм	Поворот относительно оси X, град
20 ^{***}	398,2	Зеркало	16	-2,2	-	-
-187	-55	Зеркало	90	0,3	-	-
∞	15,8	Зеркало	11	-	-18 ^{**}	35 ^{**}
∞	8,393	Зеркало	20	-	-40 ^{**}	125 ^{**}

* Для второго канала используется марка оптического стекла ZnSe (селенид цинка).
 ** Для второго канала значения имеют противоположные знаки.
 *** Расположение апертурной диафрагмы.

Основные полученные характеристики после оптимизации: высота предмета ± 45 мм; фокусное расстояние 70,31 мм; диаметр входного зрачка 200 мм; рабочее диафрагменное число 9,4; продольная длина системы 398,2 мм.

Ход лучей первой ветви (первого канала) оптической схемы приведен на рис. 3, а, второй ветви (второго канала) — на рис. 3, б, двух ветвей — на рис. 3, в.

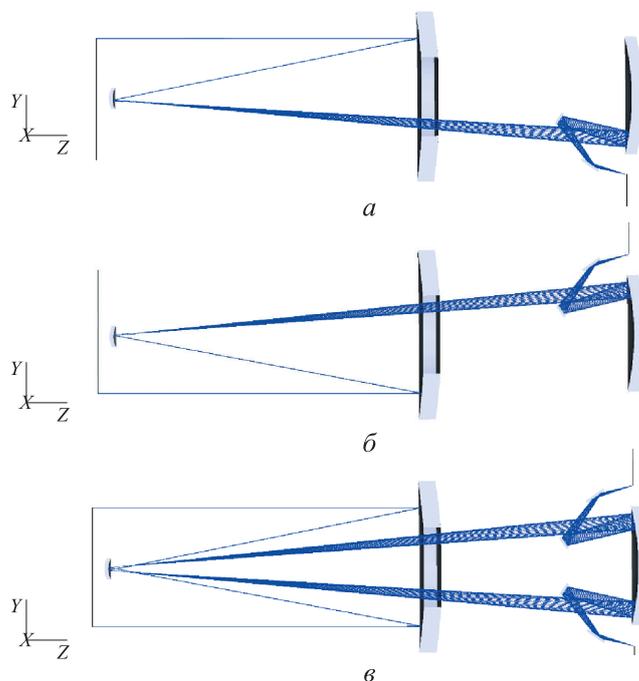


Рис. 3. Ход лучей первой (а) и второй (б) ветвей оптической схемы, ход лучей двух ветвей (в)

Для сопоставления с результатами до проведения оптимизации, запишем значения aberrаций после оптимизации.

Значения aberrаций после оптимизации

Продольная сферическая, мм	0,0372
Меридиональная кома, мм	0,0013
Астигматизм (астигматическая разность), мм	0,0169
Кривизна поля (средняя кривизна поля), мм	0,0089
Дисторсия, %	3,8636

По сравнению со схемой до оптимизации сферическая aberrация уменьшилась примерно в 30 раз, кома осталась на том же уровне, астигматизм уменьшился в 10 раз, кривизна поля — в 115 раз, а дисторсия — более чем в 700 раз.

Диаграммы пятна рассеяния для обеих ветвей схемы приведены на рис. 4. Радиусы кружка Эйри указаны для длин волн 0,53 и 1,06 мкм.

Графики среднеквадратического значения (СКЗ) ошибок волнового фронта в зависимости от линейного поля (от ряда точек на «предмете»), имеющие один и тот же вид для двух ветвей оптической схемы, приведены на рис. 5.

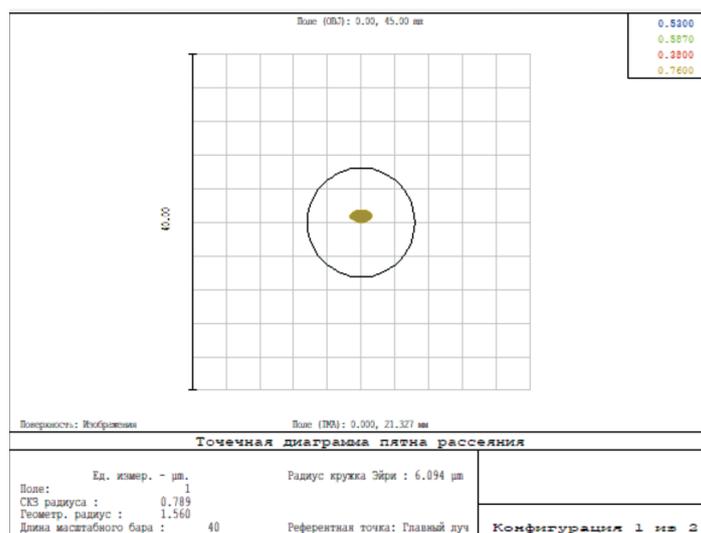
Для характеристики качества изображения приведена функция концентрации энергии по пятну рассеяния (рис. 6), одинаковая для двух ветвей оптической схемы по аналогии с графиком на рис. 5.

Для оценки трудоемкости изготовления такой оптической системы выполнен расчет ее чувствительности. Предельные значения децентрировки и наклона оптических компонентов (зеркал) одинаковые для двух ветвей схемы приведены в табл. 2. Порядок зеркал указан с учетом хода луча (см. рис. 1). Расчет выполнен исходя из условия, что максимальное падение модуляционной передаточной функции составляет не более 15 % (на предельной пространственной частоте Найквиста).

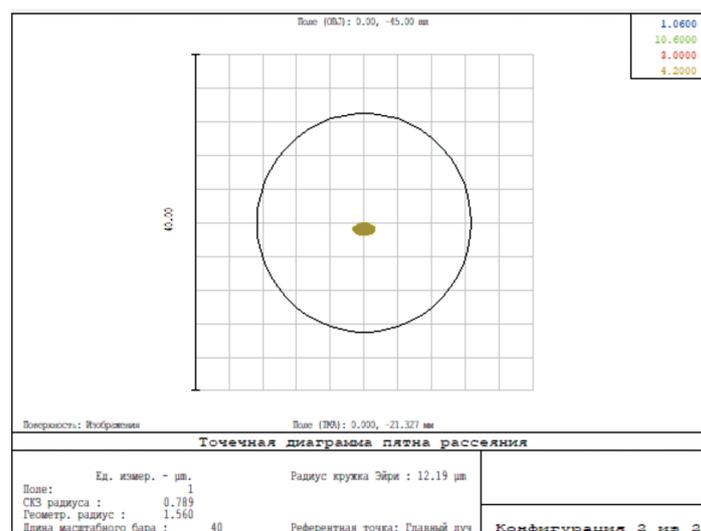
Таблица 2

Допуск на изменение положения оптических компонентов (зеркал), предельный наклон 1'

Зеркало	Предельная децентрировка, мм
Главное	0,01
Вторичное	0,01
Третье	0,01
Первое компоновочное	0,005
Второе компоновочное	0,01



а



б

Рис. 4. Скриншот диаграммы пятна рассеяния для первой (а) и второй (б) ветвей оптической схемы

Примерный конструктивный облик приемного оптического канала приведен на рис. 7. Розовым цветом схематически показано пространственное распределение хода лучей от предположительно двух источников отраженного когерентного излучения. Синим цветом показаны фотоприемные устройства, чувствительные к соответствующему спектральному диапазону каждого источника отраженного излучения.

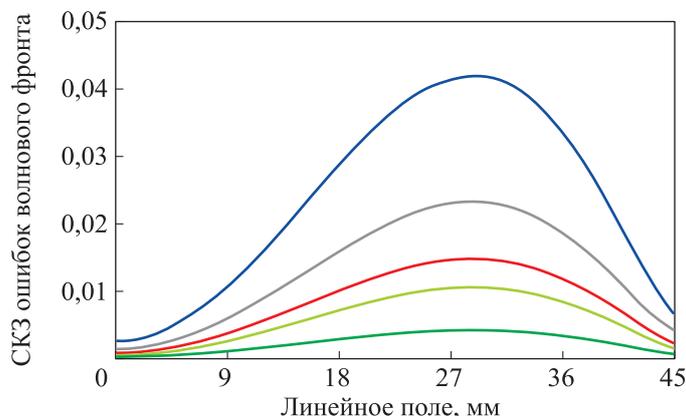


Рис. 5. Зависимости СКЗ ошибок волнового фронта от линейного поля

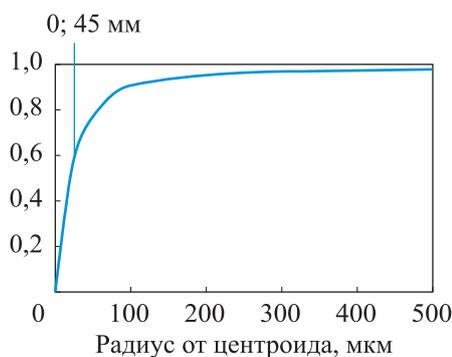


Рис. 6. Функция концентрации энергии по пятну рассеяния

Конструкция предполагает размещение объектива в металлическом корпусе в форме трубы, выполненного из титанового сплава марки ВТ1-00. Поскольку для приемного канала выбрана зеркальная

схема, основное внимание следует уделить изготовлению и защите поверхности зеркал. В качестве оптического зеркального покрытия выбирается серебряное запаянное покрытие на оптическом стекле марки К-8. На поверхность зеркала наносится защитная диэлектрическая пленка.

Зависимость коэффициента отражения от длины волны для такого покрытия в спектральном диапазоне 0,25...12 мкм приведена на рис. 8².

В интервале длин волн 0,5...0,7 мкм среднее отражение такой пленки составляет $R > 95 \%$, а в интервале 3...15 мкм — $R > 98 \%$.

Распознавание и идентификация объектов. Общая статистическая методика работы решателя при идентификации объектов по полученным сигналам в двух и более спектральных диапазонах приведена в [5]. Однако в рассмотренном случае активной ОЭС наиболее оптимальным следует

² Tydex: оптические покрытия. tydexoptics.com: веб-сайт.

URL: https://www.tydexoptics.com/ru/products/optical_coatings (дата обращения: 29.01.2024).

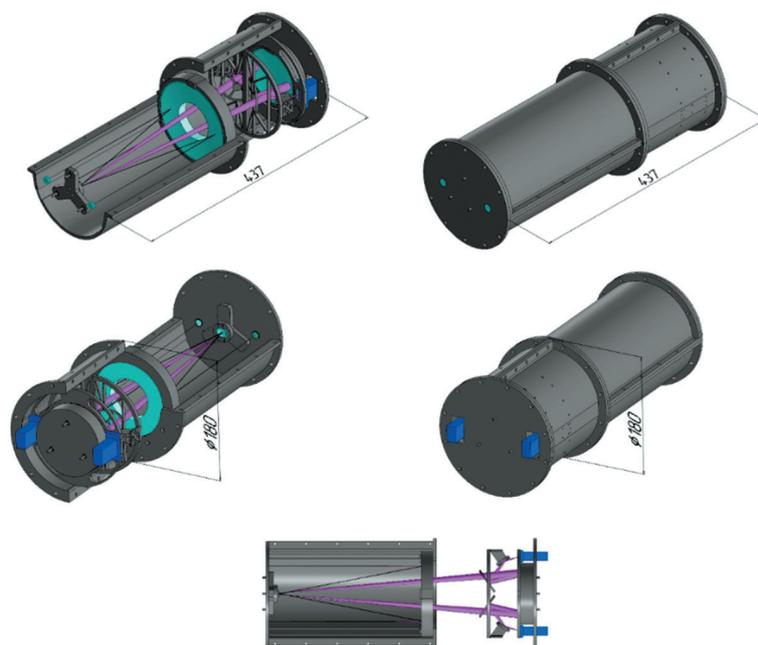


Рис. 7. Примерный конструктивный облик приемного канала лазерного локатора

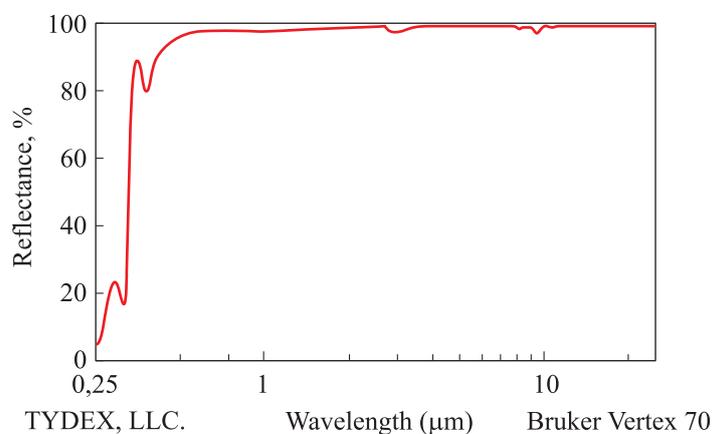


Рис. 8. Скриншот спектров отражения от серебряного покрытия с диэлектрической защитной пленкой [6]

признать не байесовский критерий качества принятия решения, а именно критерий Неймана — Пирсона, имеющий наибольшую мощность решения даже при неодинаковой значимости признаков. Отличием использования данного критерия является возможность задания значения условной вероятности ложной тревоги $P_{л.т}$ и вероятности пропуска цели $P_{пр}$ на этапе составления технического задания и возможность определить уровень

значимости принимаемого решения о наличии или отсутствии объекта по отсчетам реализации данного события на этапе натурного испытания. Процедура принятия решений при многоспектральной системе обнаружения и методы повышения дальности обнаружения ранее рассмотрены в [6]. В настоящей работе предлагается техническая реализация оценки дополнительных признаков обнаружения объектов по дистанционному измерению температуры пламени факела работающего двигателя. При сгорании авиационного керосина в спектрах рассеяния света пламени присутствуют линии, отвечающие нескольким компонентам углеводородов [7]. В зависимости от химического состава, места добычи и способа переработки нефти, керосин может содержать: алканы — ациклические углеводороды с общей формулой C_nH_{2n+2} , циклоалканы — циклические насыщенные углеводороды, представителями которых являются циклопропан, циклобутан, циклопентан и циклогексан. В меньшем количестве в состав керосина входят также ароматические соединения — циклические непредельные углеводороды. Кроме того, в молекулах углерода присутствуют непредельные углеводороды с двойными и тройными связями и примеси сернистых и азотистых соединений [8, 9]. Наибольший процент в составе керосина занимают алканы и циклоалканы. Поскольку пламя керосина представляет собой разогретую ионизованную смесь атомов и молекул низкомолекулярных соединений, спектр излучения или рассеяния света содержит информацию о внутримолекулярных переходах при заданной температуре. Частоты переходов лежат в так называемых полосах Свана и принадлежат валентным связям таких молекул, как C_2 , CH , CN , CO_2 , H_2O и др. Интенсивные полосы, обнаруживаемые в спектрах ИК-поглощения, в спектрах комбинационного рассеяния света (КРС) и в спектрах вынужденного КРС (ВКР), принадлежат валентным колебаниям молекул $C-H$ в алканах на частотах $2850...3000\text{ см}^{-1}$, нафтеновых углеводородах с молекулярными группами CH_2 на частотах $3050...3100\text{ см}^{-1}$ (циклопропан) и в циклогексане на частотах $2995...3035\text{ см}^{-1}$, а также валентному колебанию двойной связи молекулы C_2 алканов на частоте $\nu \approx 1600\text{ см}^{-1}$ (1598 см^{-1}) [10–12].

Технология дистанционного измерения термодинамических параметров атмосферы, малых газовых концентраций экологически значимых компонентов углеводородов в настоящее время разработана на основе средств активного лазерного зондирования (лидары). Лазерное зондирование является наиболее прогрессивным методом в сравнении с другими методами изучения атмосферы, поскольку позволяет измерять ее параметры с высоким пространственно-временным разрешением, охватывая высоты

от приземных практически до мезосферы [13]. Существуют лидары, построенные на базе метода упругого рассеяния света, поглощения и спонтанного комбинационного рассеяния света на колебательно-вращательных переходах молекул для измерения концентраций озона, аэрозолей, температуры атмосферы в широкой области высот [14–16]. Однако комплекс лазерного зондирования атмосферы имеет своей целью изучение малых концентраций газов, в частности ПДК углеводородов и пространственное распределение концентрации вещества в атмосфере [17]. Задача настоящей работы — использование лидарного принципа измерения температуры углеводородов в пламени, имеющих высокую концентрацию молекул, не требующего специальной аппаратуры для усиления слабого сигнала рассеяния света на факеле. Измерение температуры факела лазерным локатором имеет тот же принцип рассеяния света на колебательных переходах молекул, что и рамановский лидар [15, 18], и основано на различной зависимости от температуры спектральной интенсивности рассеяния света на стоксовой и антистоксовой компонентах рамановского сдвига частоты от возбуждающей линии. Отношение спектральных интенсивностей соответствующих полос может быть выражено через бозе-фактор вероятностей переходов с испусканием и поглощением фононов:

$$\frac{I_{as}}{I_s} = \left(\frac{\nu_{as}}{\nu_s} \right)^4 \exp\left(-\frac{h\nu}{kT} \right), \quad (16)$$

где ν_{as} — частота антистоксовой компоненты излучения; ν_s — частота стоксовой компоненты излучения; h — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме; $\nu = |\nu_0 - \nu_s(\nu_{as})|$ — разность волновых чисел падающего излучения и стоксовой (антистоксовой) компоненты; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Измерение температуры факела можно проводить по трем реперным линиям колебательных переходов. В этом случае существенно уменьшается ошибка определения температуры, поскольку молекулы алканов, циклоалканов и ароматических углеводородов находятся в одинаковых условиях в пламени, но при различных (больших) значениях концентраций.

В качестве примера измерения температуры факела рассмотрим полосу валентного колебания двойной связи молекулы C_2 алканов на частоте $\nu \approx 1600 \text{ см}^{-1}$ как компоненту комбинационного рассеяния света, при этом стоксовая компонента излучения имеет частоту $\nu_s = 938249,6 \text{ см}^{-1}$, а антистоксовая — $\nu_{as} = 941449,6 \text{ см}^{-1}$. Разность волновых чисел соответствует линии комбинационного рассеяния $\nu = 1600 \text{ см}^{-1}$.

Температура пламени:

$$T = 2304,69 \ln \left(0,9865 \frac{I_{as}}{I_s} \right). \quad (17)$$

Измерение спектральной интенсивности рассеяния на стоксовой и антистоксовой компонентах излучения ведется при длине волны возбуждающей линии $\lambda_0 = 1,064$ мкм. Блок измерения спектральной интенсивности рассеяния стоксовой и антистоксовой компонент излучения представляет собой двухканальное приемное устройство и состоит из двух фотодиодов (ФД) на длинах волн 1,062 и 1,066 мкм с автоматической подстройкой частоты напряжением, подаваемым на ФД. Перед диодами устанавливается интерференционный фильтр для подавления рассеянного рэлеевского излучения. Структурная схема блока анализа спектральной интенсивности рассеяния и измерения температуры приведена на рис. 9.

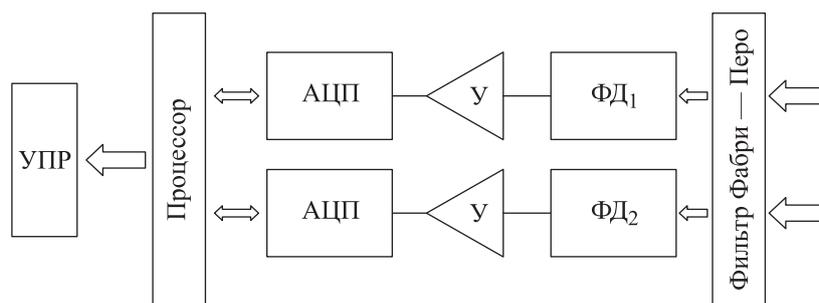


Рис. 9. Структурная схема блока анализа спектральной интенсивности рассеяния и измерения температуры:

УПР — устройство принятия решения; Процессор — счетное устройство, в котором рассчитывается температура; АЦП — аналого-цифровой преобразователь;
 У — усилитель оптического сигнала; ФД₁ и ФД₂ — первый и второй ФД;
 Фильтр Фабри — Перо — отсекает возбуждающую линию

Во время каждого измерения происходит коррекция измерений спектральной интенсивности по отношению к интенсивности центральной и боковых компонент для устранения ошибок, связанных со стабилизацией излучения лазера. В качестве ПИИ можно рекомендовать кремниевые лавинные ФД серии SAT800X, ориентированные на длину волны 1064 нм и подстраиваемые на нужную длину волны подачей напряжения на ФД. В качестве интерференционного фильтра можно использовать фильтры Фабри — Перо с числом слоев 80 и 110, обеспечивающих полосу пропускания порядка 1,2 нм при близких длинах волн лазеров 1076

и 1079 нм, ширина полосы подавления (энергетическая эффективность) порядка 20 дБ [19].

После расчета температуры данные подаются в систему принятия решения [6] для процедуры выбора объекта по совокупности признаков. Этот блок встраивается во вторую ветвь оптического приемного канала наряду с другими данными по угловому сопровождению цели, определению радиальной скорости объекта и принадлежности объекта по временной форме сигнала [6]. Дальность, скорость объекта и форма определяются в первой ветви приемного канала. Передающий канал построен с однокоординатным сканирующим устройством [20].

Блок измерения температуры построен на лазерных диодах с длинами волн 1066 и 1062 нм в качестве источников излучения, однако лазерные диоды имеют малые мощности в импульсе порядка 0,2 мДж, что явно недостаточно для уверенной регистрации компонент рассеяния. Возможной реализацией метода дистанционного измерения температуры может быть использование суперконтинуумного волоконного лазера [21] с выходной мощностью до 10 Вт в не очень широком спектральном диапазоне, содержащем стоксовы и антистоксовы компоненты излучения большинства соединений углерода. Эта область может составлять от 400 до 2400 нм, тем самым обеспечивается выигрыш по мощности (дальности идентификации) и габаритным размерам лазера. Однако, чтобы спектральная плотность излучения была примерно одинакова во всем спектральном диапазоне, требуется согласование групповой скорости на больших и малых длинах волн. Большинство волоконных лазеров такое условие обеспечить не может. При таком способе измерения относительной интенсивности излучения это условие является определяющим.

Заключение. Зеркальный объектив приемного оптического канала, построенный по схеме Корша, позволяет регистрировать оптическое изображение объекта высокого качества, близкого к дифракционному, по двум ветвям различных спектральных составляющих, в видимой и ближней ИК-областях, а также в дальней ИК-области длин волн. Зеркала объектива представляют собой асферические поверхности второго порядка — эллипсоидальные, что позволило при оптимизации схемы получить отличные результаты по размерам дифракционного кружка Эйри и исправленным абберациям.

Предложен метод дистанционного измерения температуры факела объекта на основе регистрации характерных компонентов рассеянного света от пламени, содержащего продукты сгорания углеводородов, и получения реперных точек идентификации объектов. Дополнительные

признаки идентификации объекта, а следовательно, повышение уровня вероятности обнаружения оказалось возможным благодаря построенной новой схеме приемного канала.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Межерис Р.М. Лазерное дистанционное зондирование. М., Мир, 1987.
- [2] Михельсон Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. М., ФИЗМАТЛИТ, 1995.
- [3] Кузнецов-Фетисов И.Н., Якубовский С.В. Разработка инструментария для анализа оптических систем в области аббераций третьего порядка в программе Zemax. *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2022, т. 66, № 4, с. 101–115. EDN: XDKVCSV
- [4] Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л., Машиностроение, 1969.
- [5] Аникьев А.А., Калинин А.В. Статистические аспекты принятия решений при распознавании цели по нескольким спектральным каналам. *Контенант*, 2018, т. 17, № 3, с. 37–48. EDN: PZLYRJ
- [6] Аникьев А.А., Барышников Н.В., Заварзин В.И. Методы оптимизации дальности обнаружения объектов многоканальной оптико-электронной системой. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 4 (133), с. 134–152. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2020-4-134-152>
- [7] Иноземцев А.А., Саженов А.Н., Цатиашвили В.В. и др. Разработка и применение бесконтактной технологии исследования процессов горения в камере сгорания газотурбинного двигателя. *Теплофизика и аэромеханика*, 2015, т. 22, № 3, с. 373–384. EDN: RWXLKZ
- [8] Шмидт В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. М., Техносфера, 2007.
- [9] Купцов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. М., ФИЗМАТЛИТ, 2001.
- [10] Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. М., Мир, 2006.
- [11] Браун Д., Флойд А., Сейнзбери М. Спектроскопия органических веществ. М., Мир, 1992.
- [12] Беллами Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул. М., Мир, 1971.
- [13] Агишев Р.Р. Лидарный мониторинг атмосферы. М., ФИЗМАТЛИТ, 2009.
- [14] Behrendt A., Nakamura T., Tsuda T. Combined temperature lidar for measurements in the troposphere, stratosphere, and mesosphere. *Appl. Opt.*, 2004, vol. 43, no. 14, pp. 2930–2939. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.43.002930>
- [15] Behrendt A., Nakamura T., Onishi M., et al. Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient. *Appl. Opt.*, 2002, vol. 41, no. 36, pp. 7657–7666. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.41.007657>

- [16] Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб., Гидрометеоиздат, 1992.
- [17] Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Дистанционное лазерное зондирование углеводородов в атмосфере. *Письма в ЖТФ*, 2001, т. 27, № 21, с. 71–75. EDN: RYQFVL
- [18] Abyazov E.K., Privalov V.E., Shemanin V.G. The hydrocarbon molecules concentration remote measurement by lidar with the diode lasers. *Opt. Mem. Neural Networks*, 2010, vol. 19, no. 2, pp. 201–205. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1060992X10020128>
- [19] Федосеев В.Н., Жупанов В.Г. Проектирование оптических фильтров Фабри — Перо для спектрального сложения лазерных пучков. *Оптический журнал*, 2021, т. 88, № 12, с. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-12-03-10>
- [20] Аникьев А.А., Барышников Н.В., Калинин А.В. Погрешности измерения координат объекта сканирующим лазерным локационным каналом. *Контенант*, 2020, т. 19, № 5-1, с. 50–57. EDN: DNITMI
- [21] Cumberland B.A., Travers J.C., Popov S.V., et al. 29 W High power CW supercontinuum source. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, no. 8, pp. 5954–5962. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.16.005954>

Аникьев Анатолий Анатольевич — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные приборы и системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Барышников Николай Васильевич — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Лазерные и оптико-электронные приборы и системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Якубовский Станислав Владимирович — ведущий инженер-исследователь тематического научно-проектного отдела средств ДЗЗ ПАО КМЗ (Российская Федерация, 143400, Московская обл., г. Красногорск, Речная ул., д. 8).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аникьев А.А., Барышников Н.В., Якубовский С.В. Приемный оптический канал лазерного лоатора с функцией дальномера и спектроанализатора. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 3 (152), с. 4–26. EDN: SACDSP

**RECEIVING OPTICAL CHANNEL OF A LASER LOCATOR
WITH THE RANGEFINDER AND SPECTROANALYZER FUNCTIONS**

A.A. Anikiev¹

anastas@bmstu.ru

N.V. Baryshnikov¹

baryshnikov@bmstu.ru

S.V. Yakubovskiy²

yakubovskiy@mail.ru

¹ BMSTU, Moscow, Russian Federation

² PJSC KMZ, Krasnogorsk, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

The paper considers a possibility of creating an optical system for the receiving channel of a laser locator operating in a wide spectral range with high resolution. To minimize the influence of chromatic aberrations and other types of aberrations on the image quality, a modification of the Gregory mirror system (Korsch scheme) is selected with the aspherical main, secondary and third mirrors. It provides high optical performance in a wide spectral range. Design parameters, and optical characteristics are computed. The optical system image quality is assessed, it satisfies the task set, and ensures obtaining the scattering spot dimensions in the image plane close to the diffraction limit. The resulting scheme optimization makes it possible to reduce significantly values of the main aberrations in the optical system, i.e., field curvature and distortion. High image quality and optical characteristics of the resulting optical system allow expanding the laser locator functions in assessing the temperature of the aircraft flame by analyzing the Stokes and anti-Stokes components of radiation scattered from the flame in the spectral ranges of vibrational transitions of the main hydrocarbons contained in the aviation fuel. The obtained temperature values are the additional parameters for identifying an object when detected by the onboard laser locator

Keywords

Korsch scheme, laser locator, overall dimensions, scattering spot, Raman scattering method, identification

Received 22.04.2024

Accepted 21.04.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Measures R.M. Laser remote sensing. New York, John Wiley & Sons, 1984.
- [2] Mikhelson N.N. Optika astronomicheskikh teleskopov i metody ee rascheta [Optics of astronomical telescopes and methods for its calculation]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 1995.
- [3] Kuznetsov-Fetisov I.N., Yakubovskiy S.V. Development of a tool kit for the analysis of optical systems in the area of third-order aberrations in Zemax program. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka* [Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying], 2022, vol. 66, no. 4, pp. 101–115 (in Russ.). EDN: XDKVCV
- [4] Slyusarev G.G. Metody rascheta opticheskikh system [Methods for calculating optical systems]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1969.
- [5] Anikyevev A.A., Kalinin A.V. Statistical aspects of decision-making in the recognition of goals by several spectral channels. *Kontenant* [Contentant], 2018, vol. 17, no. 3, pp. 37–48 (in Russ.). EDN: PZLYRJ

- [6] Anikyevev A.A., Baryshnikov N.V., Zavarzin V.I. Methods for optimizing the objects detection range by a multi-channel optical-electronic system. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 4 (133), pp. 134–152 (in Russ.).
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2020-4-134-152>
- [7] Inozemtsev A.A., Sazhenkov A.N., Tsatiashvili V.V., et al. Development and application of noninvasive technology for study of combustion in a combustion chamber of gas turbine engine. *Thermophys. Aeromech.*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 359–369.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864315030117>
- [8] Schmidt W. Optical spectroscopy in chemistry and life sciences. An introduction. Weinheim, Wiley-VCH, 2005.
- [9] Kuptsov A.Kh., Zhizhin G.N. Furiye-KR i Furiye-IK spektry polimerov [Fourier-Raman and Fourier-IR spectra of polymers]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2001.
- [10] Pretsch E., Bullmann P., Affolter C. Structure determination of organic compounds. New York, Springer Nature, 2006.
- [11] Brown D.W., Floyd A.J., Sainsbury M. Organic spectroscopy. New York, John Wiley & Sons, 1988.
- [12] Bellami L.J. The Infra-Red spectra of complex molecules. London, Chapman and Hall, 1954.
- [13] Agishev R.R. Lidarnyy monitoring atmosfery [Lidar atmospheric monitoring]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009.
- [14] Behrendt A., Nakamura T., Tsuda T. Combined temperature lidar for measurements in the troposphere, stratosphere, and mesosphere. *Appl. Opt.*, 2004, vol. 43, no. 14, pp. 2930–2939. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.43.002930>
- [15] Behrendt A., Nakamura T., Onishi M., et al. Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient. *Appl. Opt.*, 2002, vol. 41, no. 36, pp. 7657–7666.
DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.41.007657>
- [16] Zuev V.E., Zuev V.V. Distantionnoe opticheskoe zondirovanie atmosfery [Remote optical sensing of the atmosphere]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992.
- [17] Privalov V.E., Shemanin V.G. Remote laser probing of hydrocarbons in the atmosphere. *Tech. Phys. Lett.*, 2001, vol. 27, no. 11, pp. 921–923.
DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1424393>
- [18] Ablyazov E.K., Privalov V.E., Shemanin V.G. The hydrocarbon molecules concentration remote measurement by lidar with the diode lasers. *Opt. Mem. Neural Networks*, 2010, vol. 19, no. 2, pp. 201–205. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1060992X10020128>
- [19] Fedoseev V.N., Zhupanov V.G. Design of optical Fabry — Perot filters for spectral combination of laser beams. *Opticheskiy zhurnal*, 2021, vol. 88, no. 12, pp. 3–10 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-12-03-10>

[20] Anikyev A.A., Baryshnikov N.V., Kalinin A.V. Object coordinate measurement errors by scanning laser location channel. *Kontenant* [Contenant], 2020, vol. 19, no. 5-1, pp. 50–57 (in Russ.). EDN: DNITMI

[21] Cumberland B.A., Travers J.C., Popov S.V., et al. 29 W High power CW supercontinuum source. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, no. 8, pp. 5954–5962.

DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.16.005954>

Anikyev A.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Baryshnikov N.V. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Laser and Optoelectronic Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Yakubovskiy S.V. — Lead Research Engineer, Department of Thematic Research and Design of the Earth Remote Sensing Systems, PJSC KMZ (Rechnaya ul. 8, Krasnogorsk, Moscow Region, 143400 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Anikyev A.A., Baryshnikov N.V., Yakubovskiy S.V. Receiving optical channel of a laser locator with the rangefinder and spectroanalyzer functions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 3 (152), pp. 4–26 (in Russ.). EDN: SACDSP