

**ОПТИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СПУТНИКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА  
ДЛЯ МНОГОЦВЕТНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ**

В. М. Владимиров, Л. В. Границкий, Е. Г. Лапухин\*

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: lapukhineg@sibsau.ru

*Оптическая составляющая спутниковых лазерных дальнометров выполняет следующие задачи: расширяет лазерный пучок, принимает лазерные импульсы, отраженные от спутника, и позволяет осуществлять визуальное сопровождение спутника. Перспективное решение представляет комбинированная оптическая схема, одновременно выполняющая эти задачи.*

*Приведен расчет оптической системы расширителя лазерного пучка для лазерного спутникового дальномера в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Расширитель лазерного пучка представляет зеркально-линзовую систему с входным зрачком диаметром ~ 42 мм и выходным зрачком диаметром ~ 300 мм. Коллимация лазерного пучка происходит в расширителе без дополнительной перефокусировки и дает 7-кратное увеличение. Для расширителя определены расходимости пучков для различных длин волн.*

*В обратном ходе лучей расширитель играет роль питающей оптики объектива сопровождения объекта в оптическом диапазоне. Чтобы избежать виньетирования при использовании расширителя в роли питающей оптики ПЗС-камеры для сопровождения спутника (в обратном ходе лучей), световые диаметры линз в расширителе рассчитаны соответственно.*

*Рассмотрены два варианта системы сопровождения: с использованием обычных марок стекла и с использованием стекла, имеющего особый ход дисперсии. Эквивалентное фокусное расстояние системы сопровождения составляет ~ 1760 мм. Приводится анализ изображения точечных источников и распределение световой энергии в пятне рассеяния точечного источника.*

*Рассчитанная оптическая система для широкого оптического диапазона и ближней инфракрасной области спектра может быть использована как в системах лазерной спутниковой локации, так и для лазерных радаров на поверхности Земли.*

*Фокус Куде позволяет использовать аппаратуру, установленную стационарно. При расчете оптической системы радиусы кривизны всех сферических поверхностей выбраны из рядов значений, рекомендуемых ГОСТ 1807–75, что удешевляет технологию изготовления.*

*Ключевые слова: лазерная дальнометрия, атмосферная поправка.*

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet  
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik  
Vol. 18, No. 1, P. 195–204**OPTICAL COMPONENT OF A SATELLITE LASER RANGER  
FOR MULTI-COLOR RANGE FINDING**

V. M. Vladimirov, L. V. Granitskiy, E. G. Lapukhin\*

Reshetnev Siberian State Aerospace University  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lapukhineg@sibsau.ru

*The optical cluster of a satellite laser range is used for the next goals: to expand laser beams, registering the laser impulses reflected from the satellite and visual observing of the satellite. The perspective decision for these purposes is a combined optical scheme.*

*The purpose of the research was to calculate the optical cluster of the satellite laser ranger. The expander of the laser beam works at the same time for a wide range of wavelengths without any additional refocusing. A laser beam expander is a catadioptric system with the entrance pupil diameter about 42 mm and approximately 300 mm outlet. The optical system of the expander of laser beam for the satellite laser ranging station in the optical and near infrared wavelengths is presented. The collimation of the laser beam takes place in the expander without any additional refocusing for wavelengths from 435 to 2098 nm with a sevenfold increase. The beam divergences for monochromatic radiation are defined as well.*

*In the reverse ray path the expander can be the feeding optics of object tracking lens in the optical range. To avoid vignetting when using the expander as feeding optics of CCD-camera for the satellite tracking (in the reverse ray path), the light lens diameters are calculated.*

*The authors presented two options of a lens of camera: lens containing usual optical glass and lens containing optical glass with special dispersion path: special crown (OK4) and special flint (OF1). Equivalent focal length of a lens is ~ 1760 mm. In the article the analysis of the RMS spot diameter and radial energy distribution of spot has been shown.*

*In the presented optical system Coudé focus is used which allows using the equipment installed permanently. When calculating the optical system, the radii of curvature of all spherical surfaces are recommended by All Union State Standard 1807–75 which reduces the cost of manufacturing technology.*

*The expander of laser beam may be used for satellite laser ranging station and laser radars on the Earth surface.*

*Keywords: Satellite Laser Ranging, atmospheric refraction.*

**Введение.** Наибольшую точность в измерении дальности до космических аппаратов дают спутниковые лазерные дальномерные станции. По измеренным наклонным дальностям в фиксированные моменты времени определяются координаты и скорость спутника. По векторам положения и скорости осуществляется прогноз движения космического аппарата [1].

При локации спутника, оснащенного уголковыми отражателями, предельная дальность дальномера  $D_{\max}$  зависит от параметров оптической составляющей дальномера следующим образом:

$$D_{\max} \sim 4 \sqrt{\frac{S_{\text{отр}} S_{\text{пр}}}{\Omega_{\text{пер}}}}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{пр}}$  – площадь светоприемной апертуры;  $S_{\text{отр}}$  – суммарная геометрическая площадь уголкового отражателя на спутнике;  $\Omega_{\text{пер}}$  – угол, в котором сосредоточено лазерное излучение на выходе из коллимирующей передающей оптической системы [1; 2].

Увеличение предельной дальности возможно за счет уменьшения  $\Omega_{\text{пер}}$  и увеличения  $S_{\text{пр}}$ . За минимально возможное значение  $\Omega_{\text{пер}}$  принимается угол дифракции

$\theta_{D,\lambda} \approx \frac{1,22\lambda}{D}$  для длины волны излучения  $\lambda$

на круглой апертуре коллиматора диаметром  $D$ . Увеличив апертуру лазерного пучка, уменьшается его расходимость. В спутниковых лазерных дальномерах коллиматор выполняет функцию расширителя лазерного пучка и является телескопической (афокальной) оптической системой.

Увеличение светоприемной апертуры  $S_{\text{пр}}$  позволяет принимать более слабые эхо-сигналы от спутника, что обеспечивает большую предельную дальность локации, и, как следствие, диаметр светоприемной системы имеет больший диаметр, чем расширенный лазерный пучок.

**Оптические схемы дальномеров.** Оптическая составляющая спутниковых лазерных дальномеров выполняет следующие задачи [1–4]: а) расширяет и коллимирует лазерный пучок; б) принимает лазерные импульсы, отраженные от спутника; в) позволяет осуществлять визуальное сопровождение спутника. Для выполнения этих задач существует реализация оптических систем как отдельными блоками, так и комбинированными. По поблочной схеме были ре-

ализованы спутниковые дальномеры первого поколения ЛД-1, ЛД-2, ЛД-3, «Малая сажень», телескоп траекторных измерений Алтайского оптического лазерного центра (АОЛЦ) «Сажень-Т» [5; 6]. В них оптическая составляющая реализована в трех отдельных блоках: расширитель (коллиматор) лазерного пучка, два рефлектора для регистрации эхо-сигнала и телескоп для визуального сопровождения цели. Оптическая схема расширителя в дальномерах, как правило, выполняется по схеме Галилея.

В оптической схеме дальномера «Симеиз-1873» Крымской астрофизической обсерватории, расположенного на горе Кошка, роль расширителя лазерного пучка выполняет приемная оптическая двухзеркальная система диаметром 1 м [7], причем выпуклое вторичное зеркало выполнено в виде отрицательной линзы манжена. В данном дальномере лазерный излучатель с рассеивающей линзой и фотодетектор эхо-сигнала с собирающей линзой расположены в фокусе Куде, который фиксирован в пространстве. Это позволяет использовать аппаратуру, установленную стационарно.

В дальномере «Сажень-ТМ» расширитель лазерного пучка, приемная оптическая система и оптическая система для сопровождения спутника выполнены в виде одного оптического блока. Диаметр системы при этом определяется апертурой оптической системы, принимающей отраженные от спутника эхо-сигналы, и отдельно выполнен оптический блок гидирования, который позволяет по ярким звездам соотнести инерциальную систему координат с системой координат лазерного дальномера [8].

Большое распространение в лазерных спутниковых дальномерах получили лазерные излучатели (ЛИ), в которых активным элементом является иттриво-алюминиевый гранат, активированный трехвалентным ниодимом ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}_3$ ). Преимуществами таких ЛИ являются высокий КПД преобразования электрической энергии накачки в световую энергию излучения до 2 %, более низкий порог возбуждения активных центров и возможность генерации моноимпульсов с частотой до 50 Гц [9]. В данных ЛИ происходит генерация излучения на длине волны 1064 нм и после удвоения частоты – 532 нм, которое успешно используется в лазерных спутниковых дальномерах.

Для увеличения точностных характеристик в определении дальностей до спутников возможно использование дисперсионного метода при определении поправки среднего коэффициента преломления атмосферы. Данный метод основан на одновременной

локации спутника лазерными импульсами, разнесенными по длине волны [10; 11].

Излучение, генерируемое YAG:Nd-лазерами на длине волны 1064 нм, и излучение второй гармоники 532 нм целесообразно одновременно использовать в дисперсионном методе определения поправки среднего коэффициента преломления атмосферы. В данном методе для определения поправки используется разность оптических путей для двух различных длин волн на измеряемой трассе [10–12].

Для применения дисперсионного метода необходимо, чтобы расходимость двух лазерных пучков, одновременно прошедших через коллиматор, была минимальной (предельная расходимость – дифракционная). Для этого необходима оптическая система расширителя, коллимирующая одновременно лазерные пучки с разными длинами волн без дополнительной перефокусировки, т. е. требуется система, свободная от хроматизма.

Разработка и расчет оптических комбинированных систем для лазерных дальнометров, работающих в широком диапазоне длин волн, представляет довольно интересную задачу, и ее решение позволяет увеличить точность определения дальности космического аппарата и минимизировать массово-габаритные характеристики лазерного спутникового дальномера.

Целью работы являлось рассчитать комбинированную оптическую систему, которая включает расширитель лазерного пучка, оптику приема эхо-сигнала и оптическую систему визуального сопровождения для широкой области спектра.

**Структурная схема.** Для достижения цели было решено произвести расчет оптической системы по структурной схеме, приведенной на рис. 1. Структурная схема представляет комбинированную оптическую систему, включающую в себя расширитель лазерного пучка 1 для диапазона длин волн от 435 до 2098 нм, интерференционный фильтр 2, детектор эхо-сигнала с фокусирующей линзой 3 и объектив камеры сопровождения 4 для оптического диапазона 480–644 нм.

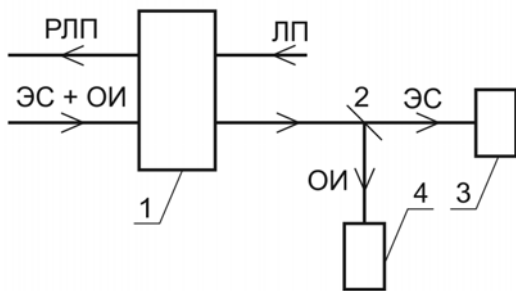


Рис. 1. Структурная схема комбинированной оптической системы спутникового лазерного дальномера: 1 – расширитель лазерного пучка; 2 – интерференционный фильтр; 3 – детектор эхо-сигнала; 4 – объектив камеры сопровождения; ЛП – лазерный пучок; РЛП – расширенный ЛП; ЭС – эхо-сигнал; ОИ – оптическое излучение

Лазерный пучок ЛП на рис. 1 проходит через расширитель лазерного пучка 1, являющийся, как правило, афокальной оптической системой. При прохождении

через него происходит увеличение апертуры лазерного луча. Расширенный в диаметре лазерный пучок РЛП направлен в сторону спутника, на котором установлены уголкового отражатели оптического диапазона. После отражения эхо-сигнал ЭС направлен в обратном направлении (в сторону лазерного дальномера). Далее ЭС проходит через оптическую систему расширителя в обратном ходе лучей, проходит через интерференционный фильтр 2 и фиксируется детектором эхо-сигнала 3, останавливая при этом счетчик временных интервалов. Наряду с ЭС через оптику расширителя в обратном ходе лучей принимается оптическое излучение ОИ всего оптического диапазона. ОИ, не пройдя через фильтр 2, направляется в объектив камеры сопровождения 4.

**Расширитель лазерного пучка.** В основе оптической схемы расширителя лазерного пучка лежит катодиоптрическая менисковая телескопическая (афокальная) система. Оптическая схема расширителя (рис. 2) состоит из окулярного трехлинзового блока 1, диагонального плоского зеркала 2, мениска 6 и зеркала Манжена 4.

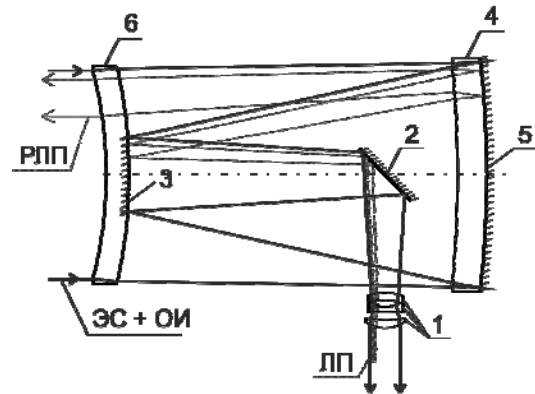


Рис. 2. Оптическая схема расширителя лазерного пучка: ЛП – лазерный пучок; РЛП – расширенный лазерный пучок; ЭС – эхо-сигнал; ОИ – оптическое излучение; 1 – окулярная часть расширителя; 2 – плоское зеркало, расположенное под углом 45° к оптической оси; 3 – центральная часть с отражающим покрытием корректирующей менисковой линзы 6; 4 – зеркало Манжена; 5 – отражающая поверхность зеркала Манжена

Расширитель в обратном ходе лучей используется: 1) как светоприемная аппаратура для регистрации отраженных эхо-сигналов при лазерной локализации спутников; 2) как питающая оптика для визуального сопровождения КА. Совмещая в себе одновременно многоволновую расширитель и приемную оптическую систему, достигается уменьшение массово-габаритных характеристик лазерного спутникового дальномера.

**Оптическая составляющая дальномера.** Для регистрации эхо-сигнала к оптической схеме расширителя лазерного пучка дополнительно вводятся объектив для оптического диапазона и фокусирующая линза с фильтрующими элементами для фокусировки эхо-сигнала на детектор (рис. 3). Соответственно расчет объектива и фокусирующих линз проводился совместно с расширителем, для исправления аберраций оптической системы в обратном ходе лучей.

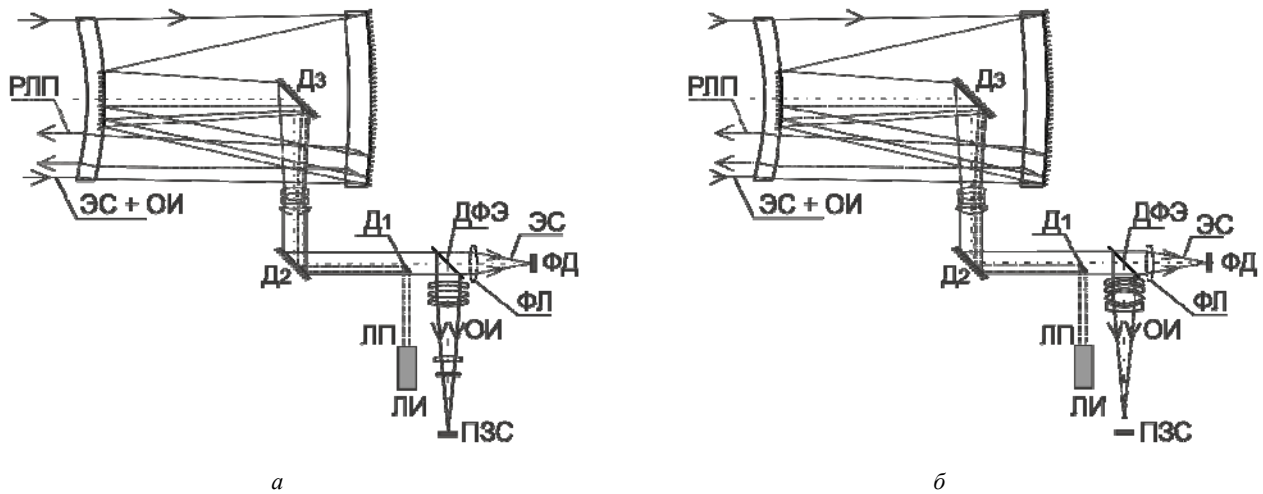


Рис. 3. Оптическая составляющая лазерного спутникового дальномера:

а – вариант № 1 с 5-линзовым фокусирующим блоком; б – вариант № 2 с 4-линзовым фокусирующим блоком; ЛИ – лазерный излучатель; ЛП – лазерный пучок; РЛП – расширенный лазерный пучок; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub>, Д<sub>3</sub> – плоские зеркала; ДФЭ – диагональный фильтрующий элемент, прозрачный для эхо-сигнала ЭС; ФЛ – фокусирующая линза; ФД – фотодетектор; ПЗС – прибор с зарядовой связью; ОИ – оптическое излучение

Таблица 1

Основные характеристики расширителя лазерного пучка

Диаметр входного зрачка, мм	42,0
Диаметр выходного зрачка, мм	298,0
Диапазон длин волн, нм	435–2098
Увеличение, крат	7,1
Поле зрения, °	0,4

**Ход лучей в оптической схеме.** Лазерный источник ЛИ генерирует лазерный импульс и включает счетчик интервалов времени. Лазерный пучок ЛП с помощью плоских зеркал Д<sub>1</sub> и Д<sub>2</sub> направляется в окулярный трехлинзовый блок расширителя лазерного пучка. Лазерный луч после прохождения расширителя направляется в сторону лоцируемого объекта, на котором расположены уголкового отражатели. После отражения от уголкового отражателей эхо-сигнал проходит через расширитель, в обратном ходе лучей отражается от зеркала Д<sub>2</sub>, проходит через прозрачный для него диагональный фильтрующий элемент ДФЭ. Фокусирующая линза ФЛ фокусирует ЭС на регистрирующей поверхности фотодетектора ФД, который дает команду на завершение счета интервалов времени.

Одновременно с ЭС в расширитель в обратном ходе лучей поступает оптическое излучение, которое, пройдя через расширитель, отражается от плоского зеркала Д<sub>2</sub>. Отразившись от поверхности ДФЭ, с помощью оптического блока фокусируется на регистрирующей поверхности прибора с зарядовой связью ПЗС.

**Расчет оптической схемы.** Расчет проводился в два этапа. Первоначально был рассчитан и оптимизирован расширитель лазерного пучка. Затем, используя расширитель в обратном ходе лучей как часть системы визуального контроля наведения и сопровождения спутника, был рассчитан фокусирующий блок. Линза, фокусирующая эхо-сигнал на фотодетекторе, рассчитывается тоже совместно с расширителем лазерного пучка в обратном ходе лучей.

**Характеристики расширителя лазерного пучка.**

Основные характеристики расширителя лазерного пучка приведены в табл. 1. Оптимизация параметров оптических элементов проходила таким образом, чтобы радиусы кривизны поверхностей оптических элементов совпадали с рядами рекомендованных значений радиусов сферических поверхностей согласно ГОСТ-1807–75 [13].

Расчет и оптимизация параметров расширителя проводились для поля зрения 0,4°. Это позволяет решить проблему сканирования путем отклонения луча лазера от оптической оси на угол ±0,2°.

Аберрации оптической системы минимизировались для спектральных линий, которые равномерно покрывают рабочий диапазон расширителя 435,8343, 479,9914, 546,0740, 656,2725, 1060,0, 1529,5820, 1700,0 и 1970,09 нм.

Точечные диаграммы расходимости полноапертурного пучка для соответствующих длин волн приведены на рис. 4. Для каждой спектральной линии приведена диаграмма для углов поля 0,0°, 0,1° и 0,2°. Сторона квадрата соответствует размеру 4 угловых секунды.

Радиусы кривизны поверхностей оптических элементов, их толщины, расстояния между элементами и марки стекол приведены в табл. 2.

Анализ аберраций расширителя был проведен при помощи модели параксиальной линзы (тонкая положительная линза, не вносящая дополнительные аберрации), которая фокусирует коллимированный пучок.

Сделана оценка среднеквадратичного угла расходимости пучка и определено число Штреля для соответствующих длин волн, падающих параллельно оптической оси расширителя, и на краю поля  $0,2^\circ$  (табл. 3). Также оценена расходимость и число Штреля для «белого» луча, в состав которого входит излучение света в диапазоне длин волн от 435 до 2098 нм. Число Штреля, близкое к единице, свидетельствует о том, что рассчитанная оптическая схема расширителя является практически безаберрационной, т. е. дифракционно-ограниченной.

**Оптическая схема визуального контроля.** Было рассчитано два варианта оптической схемы визуального контроля наведения и сопровождения. Основные характеристики рассчитанных вариантов приведены в табл. 2. Основное конструктивное отличие предложенных вариантов состоит в количестве линз в системе и в марках используемого оптического стекла. В первом варианте используются обычные стекла, а во втором варианте содержатся линзы, изготовленные из стекла с особым ходом дисперсии: особый флинт ОФ1 [14] и особый крон ОК4 [15]. Характеристики систем визуального контроля, в состав которых входит расширитель лазерного пучка в обратном ходе лучей, приведены в табл. 4.

Поэлементные характеристики (радиусы кривизны поверхностей оптических элементов, их толщины, расстояния между элементами и марки стекол) оптической схемы для визуального контроля наведения на спутник представлены в табл. 5 и 6. Расчет и оптимизация проводилась с учетом рекомендаций ГОСТ 1807–75. Все поверхности линзовых элементов – сферические, что упрощает и удешевляет изготовление.

**Анализ изображения точечных источников.** Диаграммы точечных источников для системы визуального контроля приведены на рис. 5 (рис. 5, а – первый вариант расчета объектива, рис. 5, б – второй вариант расчета). На диаграммах показаны точки рассеяния для точечных источников, расположенных на оси, на угловом расстоянии  $0,075^\circ$  и  $0,15^\circ$  от оси. В верхнем правом углу указан угол поля. Сторона квадрата равна 0,05 мм. Обозначения лучей: крестик – длина волны 479,9914 нм, круг – 546,074 нм, треугольники – 643,8469 нм.

Суммарное распределение энергии в изображении точечного источника приведено на рис. 6. Круглым маркером обозначена кривая распределения на оси, треугольным – на расстоянии  $0,075^\circ$  от оси, крестиком – на угле  $0,15^\circ$  от оси. На рис. 6, а приведено распределение для первого варианта и на рис. 6, б – для второго. В обоих случаях 100 % световой энергии укладывается в кружок диаметром  $\sim 30$  мкм.

**Фокусирующая система для длин волн 532 и 1064 нм.** Для регистрации эхо-сигнала детектором (ФД, рис. 3) после ДФЭ устанавливается фокусирующая линза ФЛ или система, которая сфокусирует эхо-сигнал на чувствительном элементе ФД. Параметры ФЛ определяются из конструктивных требований. Для примера, одиночная двояковыпуклая линза толщиной в центре 10 мм, изготовленная из плавленого кварца с радиусами кривизны поверхностей  $R_1 = 184$  мм и  $R_2 = -532$  мм, сфокусирует пучок на расстоянии 292,88 мм от последней поверхности для длины волны 532 нм и на расстоянии 300,1 мм для длины волны 1064 нм. Пятна рассеяния для этих длин волн составляют в центре поля  $\sim 0,08$  мм и  $\sim 0,25$  мм – на краю поля ( $0^\circ, 15^\circ$ ). Для многих детекторов размер такого пятна достаточен для регистрации излучения. При необходимости уменьшить пятно, следует внести в систему фокусировки дополнительный оптический элемент.

**Фокус Куде.** В оптической схеме используется система зеркал  $D_2$  и  $D_3$  (рис. 3), состоящая из плоских зеркал, расположенных под углом  $45^\circ$  к оптической оси, позволяющая использовать фокус Куде. Точка фокуса Куде в оптической системе неподвижна относительно станины дальномера и поверхности Земли. Изображение, построенное оптической системой в фокальной плоскости, во время сопровождения цели претерпевает лишь вращение около точки фокуса. Использование фокуса Куде позволяет использовать стационарно установленную аппаратуру: детектор эхо-сигнала с фокусирующей линзой, объектив камеры сопровождения с фотодетектором оптического изображения и лазерный источник. Установка оборудования на станине лазерного дальномера снижает нагрузку на опорно-поворотное устройство, что позволяет снизить ее вес.

Таблица 2

Поэлементные данные оптических элементов расширителя лазерного пучка

№ поверхности	Радиус кривизны, мм	Световой диаметр, мм	Толщина, мм	Наполнение, материал
1	50,23	42,8	12,0	ЛК7
2	155,60	40,3	11,7	воздух
3	-1061,7	37,2	8,1	К8
4	47,32	35,0	15,0	Воздух
5	-60,67	36,0	11,4	ТФ10
6	-68,39	39,7	180,0	Воздух
7	$\infty$	94,6	-390,0	Воздух
8	-732,80	112,0	510,4	Воздух
9	-1845,0	333,4	32,0	ЛК7
10	-1599,6	344,2	-32,0	ЛК7
11	-1845,0	341,7	-510,4	воздух
12	-732,8	325,8	-32,0	ЛК7
13	-632,4	320,2		

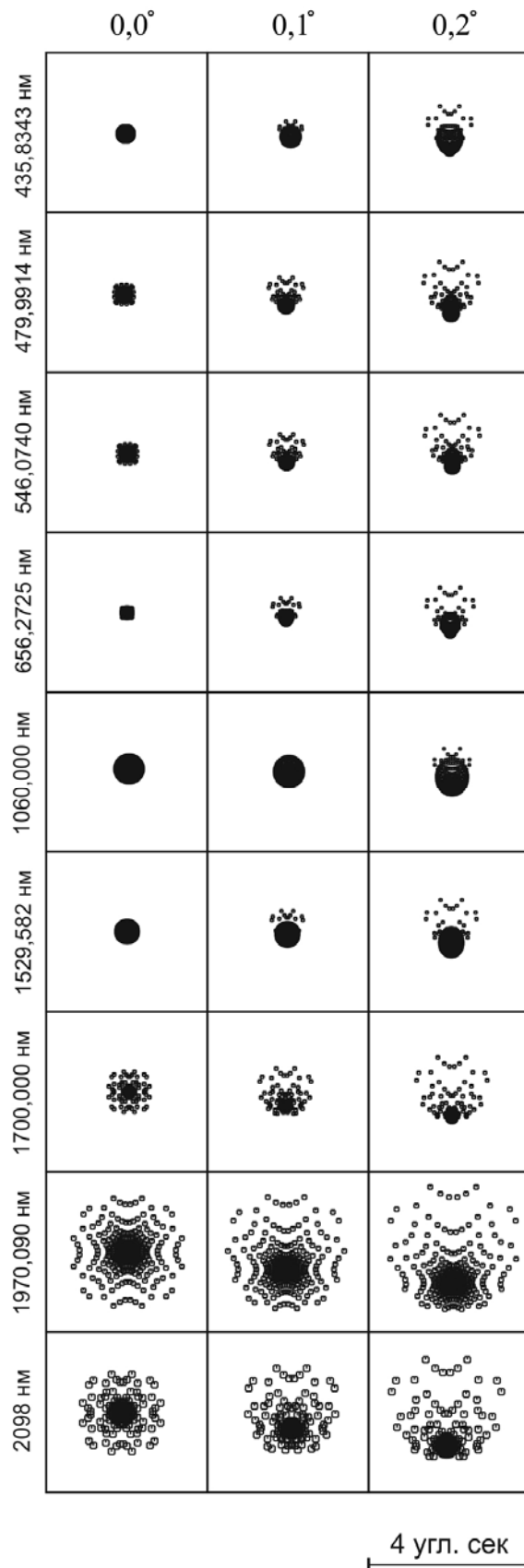


Рис. 4. Точечные диаграммы расхождения лазерного пучка на выходе из расширителя для соответствующих длин волн в зависимости от угла: 0° – входящий лазерный пучок параллелен оптической оси расширителя; 0,1° и 0,2° – угол между оптической осью расширителя и входящим лазерным пучком

Таблица 3

## Расходимость пучков для различных длин волн после прохождения расширителя, число Штреля

Длина волны, нм	Угол поля, °	Расходимость, "	Число Штреля
435,8343	0,0	0,25	0,984
	0,2	0,52	0,938
479,9914	0,0	0,23	0,988
	0,2	0,56	0,952
546,0740	0,0	0,18	0,992
	0,2	0,51	0,965
656,2725	0,0	0,18	0,996
	0,2	0,50	0,978
1060,0	0,0	0,21	0,999
	0,2	0,53	0,992
1529,5820	0,0	0,33	0,999
	0,2	0,62	0,995
1700,0	0,0	0,39	0,999
	0,2	0,66	0,996
1970,09	0,0	1,34	0,998
	0,2	1,51	0,995
2098	0,0	2,1	0,998
	0,2	2,2	0,995
435,0–2098,0	0,0	2,11	0,982
	0,2	2,25	0,950

Таблица 4

## Общие характеристики объектива камеры сопровождения

Характеристика	Вариант	
	1	2
Диаметр входного зрачка, мм	320,2	320,2
Эквивалентное фокусное расстояние, мм	1763,6	1770,2
Фокальное отношение	5,51	5,53
Масштаб в фокальной плоскости, мкм / "	8,5	8,5
Основной спектральный диапазон, нм	480–644	480–644
Кривизна поля зрения	Плоскость	Плоскость
Угловой диаметр поля зрения, градусы	0,3	0,3
Линейный диаметр поля зрения, мм	9,2	9,2
Задний отрезок, мм	120,03	224,65
Среднеквадратический диаметр изображения точечного источника (центр поля / край поля), мкм	7,0 / 13,0	4,5 / 7,7
Диаметр пятна рассеяния, в пределах которого находится 80 % световой энергии изображения точечного источника (центр поля / край поля), мкм	7,0 / 19,2	6,2 / 8,4
Типы поверхностей	Сфера	Сфера
Количество линз	5	4
Марки используемых стекол	ТФ10, Л2К7	ОФ1, ОК4, Пл. кварц
Фокальная поверхность	Плоскость	Плоскость

Таблица 5

## Конструктивные характеристики оптических элементов оптического кластера дальномера, представленного на рис. 3, а

№ поверхности	Радиус кривизны, мм	Световой диаметр, мм	Толщина, мм	Наполнение, материал
1	-632,40	320,20	32,00	ЛК7
2	-732,80	326,01	510,40	Воздух
3	-1845,00	345,38	32,00	ЛК7
4	-1599,60	348,02	-32,00	ЛК7
5	-1845,00	337,34	-510,40	Воздух
6	-732,80	116,37	390,00	Воздух
7	∞	108,01	-180,00	Воздух

№ поверхности	Радиус кривизны, мм	Световой диаметр, мм	Толщина, мм	Наполнение, материал
8	-68,39	51,17	-11,40	ТФ10
9	-60,67	46,55	-15,00	Воздух
10	47,32	46,14	-8,10	К8
11	-1061,70	50,61	-11,70	Воздух
12	155,60	55,14	-12,00	ЛК7
13	50,23	57,60	-100,00	Воздух
14	$\infty$	85,57	350,00	Воздух
15	205,10	74,63	7,00	ТФ10
16	134,90	73,38	9,06	Воздух
17	126,77	75,30	15,00	ЛК7
18	-281,20	74,81	10,00	Воздух
19	-137,09	73,00	7,00	ЛК7
20	-168,27	73,18	102,54	Воздух
21	128,23	52,93	10,00	ЛК7
22	444,60	50,85	24,30	Воздух
23	389,90	42,77	5,00	ТФ10
24	224,40	41,52	120,03	Воздух

Таблица 6

**Конструктивные характеристики оптических элементов оптического кластера дальномера,  
представленного на рис. 3, б**

№ поверхности	Радиус кривизны, мм	Световой диаметр, мм	Толщина, мм	Наполнение, материал
1	-632,40	320,20	32,00	ЛК7
2	-732,80	326,01	510,40	Воздух
3	-1845,00	345,38	32,00	ЛК7
4	-1599,60	348,02	-32,00	ЛК7
5	-1845,00	337,34	-510,40	Воздух
6	-732,80	116,37	390,00	Воздух
7	$\infty$	108,01	-180,00	Воздух
8	-68,39	51,17	-11,40	ТФ10
9	-60,67	46,55	-15,00	Воздух
10	47,32	46,14	-8,10	К8
11	-1061,70	50,61	-11,70	Воздух
12	155,60	55,14	-12,00	ЛК7
13	50,23	57,60	-100,00	Воздух
14	$\infty$	85,57	350,00	Воздух
15	143,22	74,69	7,00	ОФ1
16	71,12	72,73	2,60	Воздух
17	59,16	75,25	8,00	Пл. кварц
18	62,52	73,60	4,40	Воздух
19	75,86	74,24	25,00	ОК4
20	-69,82	73,54	2,50	Воздух
21	-63,10	71,77	8,00	Пл. кварц
22	-216,80	70,51	225,12	Воздух



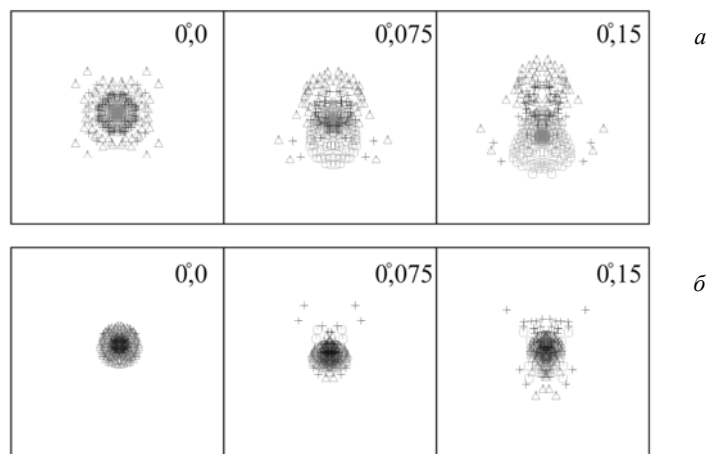


Рис. 5. Точечные диаграммы точечного источника для двух вариантов расчета:  
а, б – варианты расчета

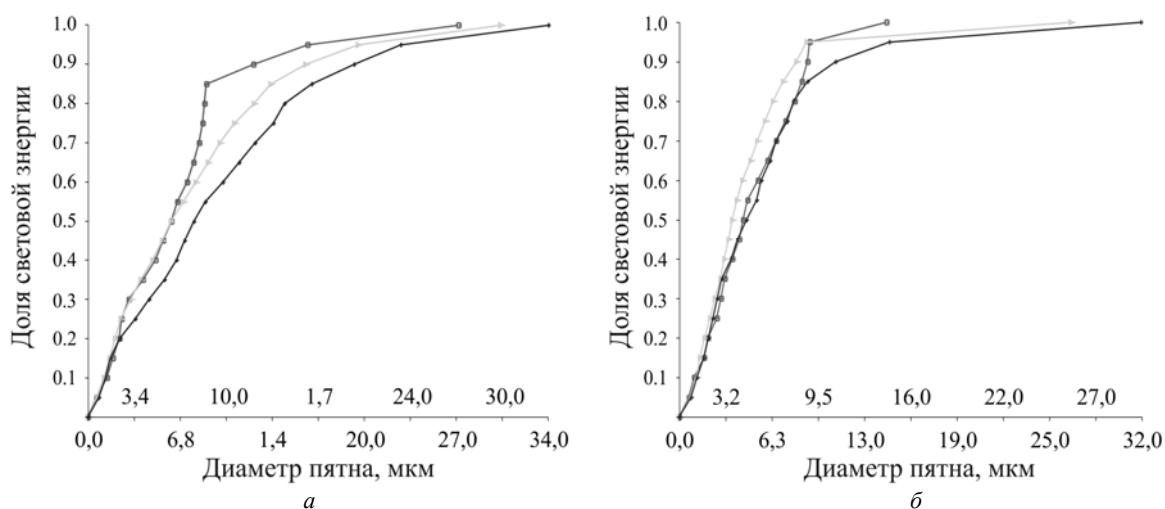


Рис. 6. Суммарное распределение световой энергии в изображении точечного источника света на оси и на угловом расстоянии  $0,075^\circ$  и  $0,15^\circ$  от нее:  
а – для первого варианта; б – для второго варианта

**Заключение.** Представленная в работе комбинированная оптическая система лазерного спутникового дальномера состоит из основных условных блоков: 1) расширитель лазерного пучка; 2) расширитель лазерного пучка + фокусирующий блок визуального контроля; 3) расширитель лазерного пучка + фокусирующий блок эхо-сигнала.

Расширитель лазерного пучка позволяет одновременно коллимировать оптическое излучение для длин волн оптического и ближнего инфракрасного диапазона (435–2098 нм) без дополнительной перефокусировки. Анализ расходимости пучка показал, что данная схема расширителя является дифракционно-ограниченной. Рассчитанная схема расширителя позволяет осуществлять сканирование лучом лазера в пределах  $\pm 0,2^\circ$  путем «качания» лазерного источника.

В обратном ходе лучей расширитель лазерного пучка и введенный дополнительно фокусирующий блок визуального контроля позволяет контролировать наведение и сопровождение цели во время локации

путем визуального отображения на экранах монитора. Данный блок рассчитан в двух вариантах: с обычными оптическими стеклами и с оптическими стеклами, имеющими особый ход дисперсии.

В данной системе за счет плоских зеркал используется фокус Куде, который позволяет использовать стационарно установленную аппаратуру на станине дальномера, т. е. для нее нет жестких ограничений по весу и габаритам.

Рассчитанная система позволяет коллимировать лазерный пучок в диапазоне от 435 до 2098 нм без дополнительной перефокусировки. Благодаря этому возможно использование двулучевой локации космических аппаратов, что позволяет определить поправку в определение среднего коэффициента преломления атмосферы дисперсионным методом, т. е. улучшить точностные характеристики лазерного спутникового дальномера.

Упрощению и удешевлению процесса изготовления оптических компонентов объектива способствует

отсутствие асферических поверхностей, наиболее употребительные радиусы кривизны для сферических поверхностей из списка ГОСТ 1807–75, марки оптического стекла для линз, которые выбраны из каталога отечественного производителя.

### Библиографические ссылки

1. Аснис Л. А., Васильев В. П. Лазерная дальнометрия. М. : Радио и связь, 1995. 256 с.
2. Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М. Основы импульсной лазерной локации. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 571 с.
3. Лазерные приборы и методы измерения дальности / В. Б. Бокшанский [и др.] М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 92 с.
4. Михеечев В. С. Геодезические светодальномеры. М. : Недра, 1979. 222 с.
5. Алтайский оптико-лазерный центр [Электронный ресурс]. URL: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-set/139-2009-04-13-12-49-38.html> (дата обращения: 10.04.2016).
6. Четырехосный полуавтоматический спутниковый лазерный дальномер ЛД-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Рига, 1983. 88 с.
7. Project to Optimize the Simeiz-1873 LSR Optical System / O. A. Minin [et al.] // Bull. of the Crimean Astrophys. Obs. 2008. Vol. 104, No. 1. P. 199–203.
8. Лазерный дальномер “Сажень-ТМ-Д” [Электронный ресурс]. URL: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-set/115-2009-04-13-11-00-28.html> (accessed: 15.09.2015).
9. Лазеры на алюмоинитриевом гранате с ниодимом / Г. И. Зверев [и др.] М. : Радио и Связь, 1985. 143 с.
10. Прилепин М. Т. О новом способе вычисления рефракции с использованием дисперсии света // Труды ЦНИИГАИК, М. 1957. Вып. 114. С. 127.
11. Degnan J. J. Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review // in Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology / D. E. Smith and D. L. Turcotte (Eds.). AGU Geodynamics Series. 1993. Vol. 25. P. 133–162.
12. Abshire J. B., Gardner C. S. Atmospheric Refractivity Corrections in Satellite Laser Ranging // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1985. Vol. GE-23, No. 4. P. 414–425.
13. ГОСТ 1807–75. Радиусы сферических поверхностей оптических деталей. Ряды числовых значений. Введ. 01.01.1977. М. : Изд-во стандартов. 19 с.
14. Glass type OF1. URL: [http://lzos.ru/glass\\_pdf/OF1.pdf](http://lzos.ru/glass_pdf/OF1.pdf) (accessed: 24.11.2015).
15. Glass type OK4. URL: [http://lzos.ru/glass\\_pdf/OK4.pdf](http://lzos.ru/glass_pdf/OK4.pdf) (accessed: 24.11.2015).

### References

1. Asnis L. A., Vasil'ev V. P. *Lazernaya dal'nometriya* [Laser distances measurement]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1995, 256 p.

2. Kozintsev V. I., Belov M. L., Orlov V. M. *Osnovy impul'snoy lazernoy lokatsii* [Bases of a laser location]. Moscow, MGTU Publ., 2010, 571 p.

3. Bokshanskiy V. B., Bondarenko D. A., Vyazovykh M. V. et al. *Lazernye pribory i metody izmereniya dal'nosti* [Laser devices and methods of measurement of range]. Moscow, MGTU Publ., 2012, 92 p.

4. Mikheechev V. S. *Geodezicheskie svetodal'nomery* [Light rangefinder for geodesy]. Moscow, Nedra Publ., 1979, 222 p.

5. *Altayskiy optiko-lazernyy tsentr* [Altai optical laser center] (In Russ). Available at: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-set/139-2009-04-13-12-49-38.html> (accessed: 24.11.2015).

6. *Chetyrekhosnyy poluavtomaticheskiy sputnikovyy lazernyy dal'nomer LD-2. Tekhnicheskoe opisanie i instryuktsiya po ekspluatatsii* [Semi-automatic satellite laser range finder of LD-2]. Riga, 1983, 88 p.

7. Minin O. A., Neyachenko D. I., Artyomov I. V., Dmitrova A. I. Project to Optimize the Simeiz-1873 LSR Optical System. *Bull. of the Crimean Astrophys. Obs.* 2008, Vol. 104, No. 1, P. 199–203.

8. *Lazernyy dal'nomer "Sazhen'-TM-D"* [Laser ranger "Sazhen'-TM-D"] (In Rus). Available at: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-set/115-2009-04-13-11-00-28.html> (accessed: 15.09.2015).

9. Zverev G. I., Gameev Yu. D., Shalaev E. A., Shokin A. A. *Lazery na alyuminoitrievom granate s niodimom* [YAG: Nd Lasers]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985, 143 p.

10. Prilepin M. T. [About a new method of calculating the refraction using a dispersion of light]. *Trudy Tsnii-gaik.* 1957, Vol. 114, P. 127–135 (In Russ.).

11. Degnan J. J. Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review. *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology*. D. E. Smith and D. L. Turcotte (Eds.), AGU Geodynamics Series, 1993, Vol. 25, P. 133–162.

12. Abshire J. B., Gardner C. S. Atmospheric Refractivity Corrections in Satellite Laser Ranging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1985, Vol. GE-23, No. 4, P. 414–425.

13. *GOST 1807–75 Radiusy sfericheskikh poverkhnostey opticheskikh detaley. Ryady chislovykh znacheniy* [State Standard 1807-75 Radiuses of spherical surfaces of optical details. Ranks of numerical values]. Moscow, IPK Standartinform Publ., 1989, 19 p.

14. Glass type OF1. Available at: URL: [http://lzos.ru/glass\\_pdf/OF1.pdf](http://lzos.ru/glass_pdf/OF1.pdf) (accessed: 24.11.2015).

15. Glass type OK4. Available at: [http://lzos.ru/glass\\_pdf/OK4.pdf](http://lzos.ru/glass_pdf/OK4.pdf) (accessed: 24.11.2015).