

УДК 681.7.028.24

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-39-44

ЮСТИРОВКА ПЕРЕДАЮЩЕГО КАНАЛА ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В.В. Пронин

АО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения», Сосновый Бор, 188540, Российская Федерация

Адрес для переписки: wwp-niiki@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 08.10.19, принята к печати 09.12.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Пронин В.В. Юстировка передающего канала лазерной локационной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1. № 1. С. 39–44. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-39-44

Аннотация

Предмет исследования. Передающий канал лазерной локационной системы, составленный из лазера и телескопического расширителя его излучения, формирует на выходе из системы лазерный пучок с заданными геометрическими параметрами, в частности, он может формироваться квазипараллельным пучком или иметь перетяжку на заданном расстоянии. **Метод.** На основе методов геометрической оптики разработана высокоточная установка, позволяющая осуществлять формирование лазерного пучка с заданными геометрическими параметрами. Установка построена на базе зеркального параболического коллиматора и матричной пироэлектрической камеры, которая находится в его фокальной плоскости и имеет возможность перемещаться вдоль его оси. Плоские диагональные зеркала установлены таким образом, что делят пучок, выходящий из расширителя лазерного излучения, и направляют его на периферийные диаметрально противоположные световые зоны коллиматора. После отражения от параболы пучки сходятся под достаточно большим углом, величина которого удобна для дальнейшего анализа. Если лазерная локационная система юстируется с целью уменьшения расходимости, то матричную камеру располагают в фокальной плоскости коллиматора. Если юстировка имеет целью создать перетяжку лазерного излучения на заданном расстоянии, то тогда матричную камеру помещают на определенном расстоянии от фокальной плоскости. Процесс юстировки сводится к регистрации координат центров тяжести пучков, идущих от краев параболы при попеременном их перекрытии. Как только разница координат пучков становится соизмеримой с погрешностью измерений, процесс завершается. **Основные результаты.** Методика предполагает юстировку телескопического расширителя совместно с лазером, что устраняет ошибки, связанные с установкой этих двух компонентов друг относительно друга. При работе не требуется трудоемких перемещений фотоприемника в пространстве и последующих расчетов, и используется меньшее количество оптических элементов. Кроме того, исключается влияние флуктуаций мощности лазерного излучения. Используя эту технику юстировки, была настроена система, состоящая из CO₂-лазера с расходимостью 7,5 мрад и телескопического расширителя с увеличением 10 крат. Полученная точность юстировки составила 10 % от значения расходимости излучения лазера. Показано, что основной вклад в точность юстировки вносит погрешность регистрации координат центров тяжести изображений, которая во многом зависит от флуктуаций мощности лазерного излучения. **Практическая значимость.** Предлагаемая методика обладает малой трудоемкостью, достаточной для практического применения, точностью и может быть реализована в условиях лабораторий предприятий, осуществляющих производство лазерных локационных систем.

Ключевые слова

юстировка системы, лазеры, телескоп, коллиматорная установка, параболическое зеркало, матричная пироэлектрическая камера

Благодарности

Автор выражает благодарность за помощь на начальном этапе работы и обсуждение результатов при подготовке статьи В.В. Корогаеву, Н.Г. Кувшинову, А.В. Нужинову, А.Н. Старченко.

TRANSMISSION CHANNEL ALIGNMENT FOR LASER LOCATION SYSTEM

V. V. Pronin

JSC Research Institute of Optical and Electronic Instrumentation, Sosnovy Bor, 188540, Russian Federation
Corresponding author: wwp-niiki@rambler.ru

Article info

Received 08.10.19, accepted 09.12.19

Article in Russian

For citation: Pronin V.V. Transmission channel alignment for laser location system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 39–44 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-39-44

Abstract

Subject of Research. The transmitting channel of the laser location system, composed of a laser and its telescopic radiation expander, forms an output laser beam with specified geometric parameters. In particular, it can be a quasi-parallel beam or have a waist at a given distance. **Method.** The high-precision equipment setup is developed on the basis of geometrical optics methods providing the formation of a laser beam with preset geometrical parameters. The equipment setup is based on a mirror parabolic collimator and a matrix pyroelectric camera, which is located in its focal plane and is able to move along its axis. Flat diagonal mirrors are installed in such a way that they separate the laser beam coming out of the expander and direct it at the peripheral diametrically opposite collimator light zones. After reflection from the parabola, the beams converge at a sufficiently large angle convenient for further analysis. If the laser location system is aligned with the aim to reduce divergence, the matrix camera is positioned in the focal plane of the collimator. If the alignment is intended to create a waist of laser radiation at a given distance, then the matrix camera is placed at a certain distance from the focal plane. The alignment process is reduced to the registration of the gravity centers for the beams coming from parabola edges with their alternate overlapping. As soon as the difference in the beam coordinates becomes commensurate with the measurement error, the process is completed. **Main Results.** The technique involves the alignment of the telescopic expander together with the laser and eliminates errors associated with the installation of these two components relative to each other. During the operation, labor-intensive movements of the photodetector in space and subsequent calculations are not required, and fewer optical elements are used. Moreover, the effect of fluctuations in the laser radiation power is excluded. According to the proposed technique, a system is aligned consisting of a CO₂ laser with divergence of 7.5 mrad and a telescopic expander with tenfold magnification. The obtained alignment accuracy amounts to 10 % of the laser radiation divergence value. It is shown that the main contribution to alignment accuracy is made by coordinate registration error of the image gravity centers, which largely depends on fluctuations in the laser radiation power. **Practical Relevance.** The proposed technique has a low labor intensity, sufficient accuracy for practical application and can be implemented in the laboratories of enterprises engaged in the production of laser location systems.

Keywords

system alignment, lasers, telescope, collimator, parabolic mirror, matrix pyroelectric camera

Acknowledgements

The author expresses his gratitude to Korotaev V.V., Kuvshinov N.G., Nuzhin A.V. and Starchenko A.N. for their assistance at the initial stage of work and discussion of the results in preparing the manuscript.

Введение

В лазерных системах локационного типа, работающих по удаленным объектам, передающий канал, как правило, содержит лазер, сопрягаемый с расширителем лазерного пучка. Расширитель представляет собой телескопическую систему, которая расширяет лазерный пучок и соответственно уменьшает его расходимость. Телескопическая система выполняет либо функцию коллиматора, когда уменьшается естественная расходимость лазерного излучения, либо фокусирующую функцию, когда формирование перетяжки лазерного излучения происходит на значительном удалении от передающего канала [1–3]. В обоих случаях для телескопической системы требуется установить определенный оптический интервал — расстояние между задней фокальной плоскостью первого компонента и передней фокальной плоскостью второго компонента [4]. Методика расчета оптического интервала для телескопической системы лазерного канала приводится, например в [5]. Однако для расчета требуется задать значение конфокального параметра лазерного резонатора, расстояние от перетяжки лазерного пучка до

первой линзы телескопической системы, параметры самой телескопической системы, а после расчета иметь возможность весьма точно выставить этот интервал для лазерной длины волны.

Производители лазеров обычно не приводят значение конфокального параметра, что затрудняет подобные расчеты. Кроме этого, точная установка расчетного значения оптического интервала также является достаточно трудоемкой юстировочной операцией, поэтому на практике целесообразно выполнять юстировку телескопической системы совместно с лазером. При этом учитываются конструктивные особенности лазера и технологические погрешности изготовления телескопической системы.

Известные методы определения энергетической расходимости лазерного излучения основаны на оценке размеров пятна лазерного излучения, работают либо через определение диаметра круга, в котором заключена заданная доля энергии, либо через определение диаметра диафрагмы, через которую проходит заданная доля энергии, и обладают относительно невысокой

точностью (27–30 %)¹. Кроме того, при юстировке импульсно-периодических лазеров с пассивным затвором [6] энергия может изменяться от импульса к импульсу [7, 8]. При этом изменяется и диаметр пятна лазерного излучения, что приводит к ошибке в оценке расходимости. Ввод в схему измерения референтного канала приводит к дополнительным трудозатратам и не всегда удобен.

В работе [9] описан вариант юстировки телескопической системы до сопряжения с лазером. Юстировка выполняется на лазерной длине волны с разделением излучения, проходящего через телескопическую систему на две части и анализом сфокусированного излучения с помощью одноэлементного фотоприемника. Процедура юстировки в этом случае представляет собой достаточно трудоемкий процесс выставления фотоприемника по трем координатам. Кроме того, при таком варианте юстировки не учитываются параметры лазера, с которым впоследствии используется телескопическая система, т. е. юстировка телескопической системы происходит отдельно от лазера.

Коллиматорная установка на базе параболического зеркала и методика юстировки

В данной работе рассмотрен один из возможных высокоточных вариантов юстировки передающего канала лазерной локационной системы на установке с зеркальным коллиматором и матричной пироэлектрической камерой. Схема установки представлена на рис. 1.

В качестве объектива коллиматора используется параболическое зеркало 1. Зеркало имеет фокусное расстояние $f'_{pm} = 3000$ мм и световой диаметр 254 мм. В фокальной плоскости параболоида размещен матричный фотоприемник пироэлектрической камеры 2. Камера установлена на линейной подвижке 3, которая позволяет перемещать камеру вдоль оси параболического зеркала 1. Плоские зеркала 4 (по ходу лазерного пучка — нижнее и верхнее) установлены параллельно друг другу и позволяют направлять лазерное излучение на крайние зоны апертуры параболического зеркала. В установке использовалась матричная пироэлектрическая камера Pygosam IV (Spirigon) с размером фоточувствительной площадки $25,6 \times 25,6$ мм. Камера позволяет регистрировать лазерное излучение в диапазоне длин волн 1,06–3000 мкм. Для оценки параметров регистрируемых изображений используется программное обеспечение BeamGage, поставляемое в комплекте с камерой.

Передающий канал лазерной локационной системы составлен из лазера 5 и телескопической системы 6. Лазерное излучение, выходящее из телескопической системы, попадает на плоские зеркала 4, делится на два узких пучка и попадает на противоположные крайние зоны параболического зеркала. После отражения от зеркал оба пучка сходятся под углом α . Угол сходимости

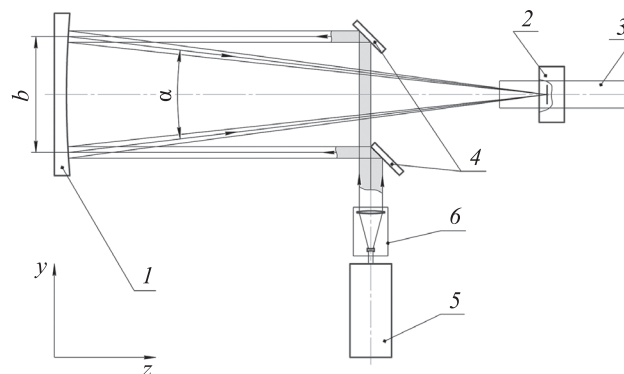


Рис. 1. Схема измерительной установки:

1 — параболическое зеркало, 2 — матричная пироэлектрическая камера, 3 — подвижка камеры, 4 — плоские зеркала, 5 — лазер, 6 — телескопическая система

сти разделенных частей лазерного пучка может быть определен по формуле:

$$\alpha = 2 \arctg \left(\frac{b}{2f'_{pm}} \right),$$

где b — расстояние между центрами пучков на параболоиде.

Величина угла сходимости α по данной схеме имеет относительно большую величину, удобную для последующего анализа.

В том случае, когда юстировка производится с целью уменьшения расходимости лазерного пучка, фотоприемник устанавливается непосредственно в фокальную плоскость параболического зеркала. Способы установки фотоприемника в фокальную плоскость могут быть различными. Один из возможных способов описан в [10].

В том случае, когда юстировка производится с целью формирования перетяжки лазерного излучения на удаленном фиксированном расстоянии от лазера, матричный фотоприемник устанавливается в смещенное от фокальной плоскости положение. Величина смещения может быть определена по формуле Ньютона [4]. Пренебрегая величиной фокусного расстояния параболического зеркала по сравнению с расстоянием, на котором должна формироваться перетяжка лазерного пучка, имеем

$$z' = \frac{f'^2_{pm}}{z},$$

где z — расстояние от телескопической системы до перетяжки лазерного пучка; z' — смещение матричного фотоприемника от фокальной плоскости параболического зеркала. Например, при дистанции формирования перетяжки $z = 1000$ м и $f'_{pm} = 3000$ мм смещение фотоприемника относительно фокальной плоскости зеркала составит $z' = 9$ мм.

Формирование картин распределения мощности в различных сечениях лазерных пучков иллюстрируют схемы на рис. 2.

При юстировке телескопической системы совместно с лазером — сечения пучков оказываются наложен-

¹ ГОСТ 26086–84 Лазеры. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения. Введен 01.07.1985. М.: Изд-во стандартов, 1985. 14 с.

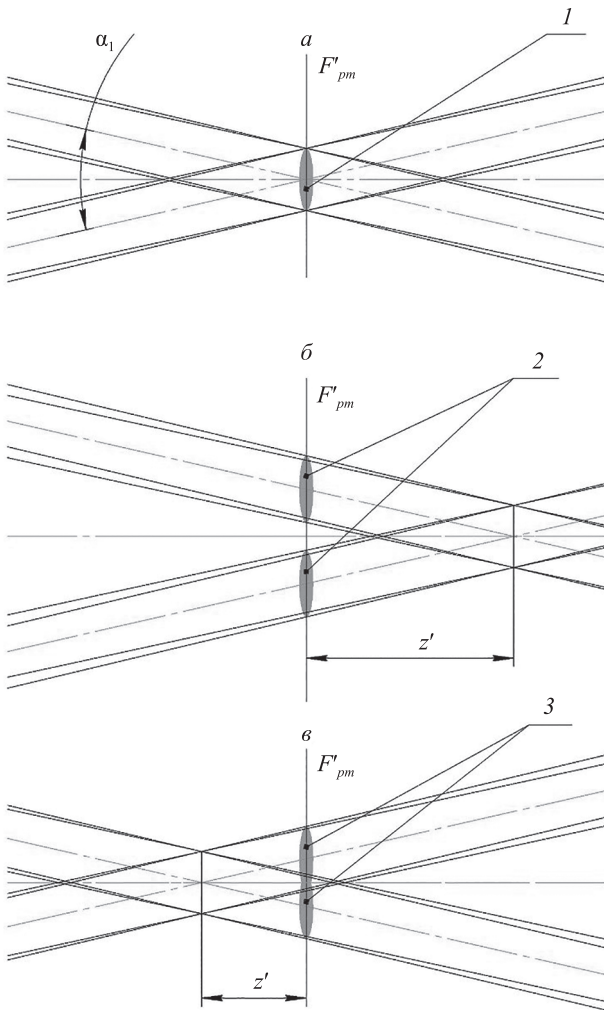


Рис. 2. Формирование картины сечения лазерных пучков в плоскости матричного фотоприемника при различных вариантах фокусировки передающего канала

1 — сечения пучков при фокусировке в плоскости фотоприемника (а); 2 — сечения пучков при фокусировке за плоскостью фотоприемника (б); 3 — сечения пучков при фокусировке перед плоскостью фотоприемника (в). α_1 — угол сходимости пучков от противоположных крайних зон параболического зеркала; F'_{pm} — фокальная плоскость параболического зеркала

ными друг на друга (рис. 2, а). На практике это легко проверить, перекрывая сначала один, а затем другой пучок. В случае совмещения сечений пучков ближе или дальше фокальной плоскости на фотоприемнике будет наблюдаться картина, в которой сечения пучков разнесены или частично перекрываются (рис. 2, б, в).

Таким образом, юстировка передающего канала сводится к контролю взаимного положения пучков лазерного излучения, идущих от верхнего и нижнего зеркал, с последующей фиксацией координат центров тяжести [11–13] сечений пучков плоскостью фотоприемника. После определения разницы между координатами центров пучков по оси Y (в плоскости рис. 1) изменяют оптический интервал между компонентами телескопической системы. Когда разница в координатах центров пучков становится меньше погрешности регистрации координат на матричном фотоприемнике, процесс настройки завершается.

Оценка точности методики юстировки

Перейдем к оценке точности методики юстировки по предлагаемой схеме. Изменение расходимости лазерного пучка, обусловленное неточностью юстировки, поясняется схемой на рис. 3. Погрешности регистрации координат центров изображений на матричном приемнике можно поставить в соответствие со смещением плоскости фокусировки от плоскости матрицы вдоль оси Z .

Выделим из лазерного пучка луч, условно определяющий расходимость. Этот луч идет под углом к оси $\gamma_d/2$ и падает на параболическое зеркало на высоте $b/2$. В плоскости установки матричного фотоприемника (эта плоскость совпадает с фокальной плоскостью параболического зеркала F'_{pm}) высота отраженного луча составляет величину y . Погрешность Δy регистрации координаты y луча обуславливает погрешность положения плоскости фокусировки Δz . Погрешность Δz может быть определена из геометрического соотношения:

$$\Delta z = \frac{2\Delta y f'_{pm}}{b}, \quad (1)$$

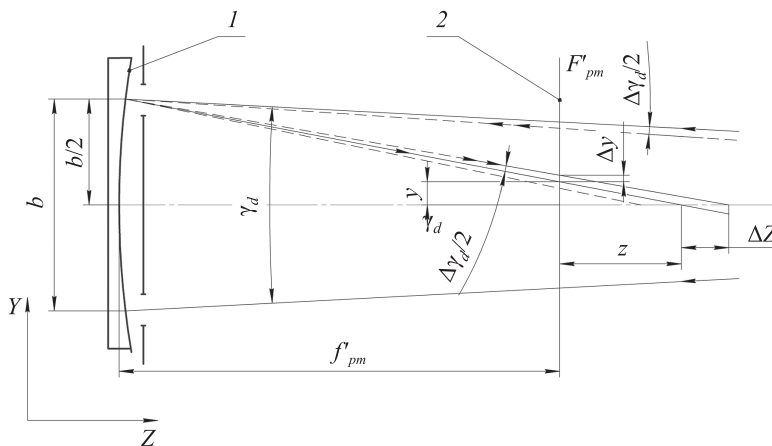


Рис. 3. Оценка погрешности определения координаты сечения лазерного пучка при юстировке: 1 — параболическое зеркало; 2 — плоскость анализа

где b — расстояние между разнесенными в пространстве частями лазерного пучка; f_{pm}^* — фокусное расстояние параболического зеркала.

По предложенной методике выполнена юстировка передающего канала с целью уменьшения расходимости лазерного пучка. Передающий канал был составлен из CO₂-лазера модели LCD-3A (АО «Плазма») с длиной волны 10,6 мкм, расходимостью излучения 7,5 мрад, работающего в одномодовом режиме генерации [14], и телескопической системы с увеличением 10 крат.

На рис. 4 представлены изображения поперечных сечений лазерных пучков, полученные в начале юстировки при отражении лазерного излучения одновременно от двух зеркал (рис. 4, а), от нижнего зеркала (рис. 4, б) и от верхнего зеркала (рис. 4, в).

На рисунках, помимо изображений сечений лазерных пучков, представлены графики сечения мощности излучения по двум направлениям и две окружности. Окружность с большим диаметром ограничивает область сбора данных для определения центра тяжести изображения, этот диаметр определяется автоматически при нажатии на виртуальную клавишу в управляющем окне программы VeamGage. Окружность с меньшим диаметром ограничивает область пучка с интенсивностью излучения на уровне $1/e^2$ от максимального уровня. Этот уровень или любой другой задается пользователем в окне программы.

До изменения оптического интервала между компонентами телескопической системы в эксперименте была выполнена оценка случайной составляющей погрешности регистрации координат изображений на матричном фотоприемнике. По выборке из 20 измерений неподвижного изображения с учетом флуктуаций мощности лазерного излучения предельное значение погрешности составило $\Delta_{y1} = 0,08$ мм, и для измерения расстояния между центрами двух изображений соответственно имеем

$$\Delta_{y12} = \Delta_{y1} \sqrt{2} \quad (2)$$

или $\Delta_{y12} = 0,12$ мм.

После этого для расчета и изменения оптического интервала использовалась величина Δz , полученная из формулы (1) по измеренному значению Δy . При изменении оптического интервала и достижении условия $\Delta y \leq \Delta_{y12}$ процесс юстировки был остановлен. Абсолютное значение Δz , которое можно получить на описанной установке для передающего канала с указанным лазером в соответствии с формулами (1)–(2), составляет величину $\Delta z = 3$ мм.

Далее, согласно рис. 3, легко перейти к погрешности $\Delta \gamma_d$ угла расходимости, обусловленной неточностью юстировки. Учитывая малость угла $\Delta \gamma_d$, получаем:

$$\Delta \gamma_d = \frac{b \Delta z}{f_{pm}^2} \quad (3)$$

Для приведенных выше параметров установки и передающего канала с указанным лазером в соответствии с (3) получаем $\Delta \gamma = 17''$. Данное отклонение составляет 10 % от полного угла расходимости.

Можно сделать вывод, что основной вклад в точность юстировки вносит погрешность регистрации

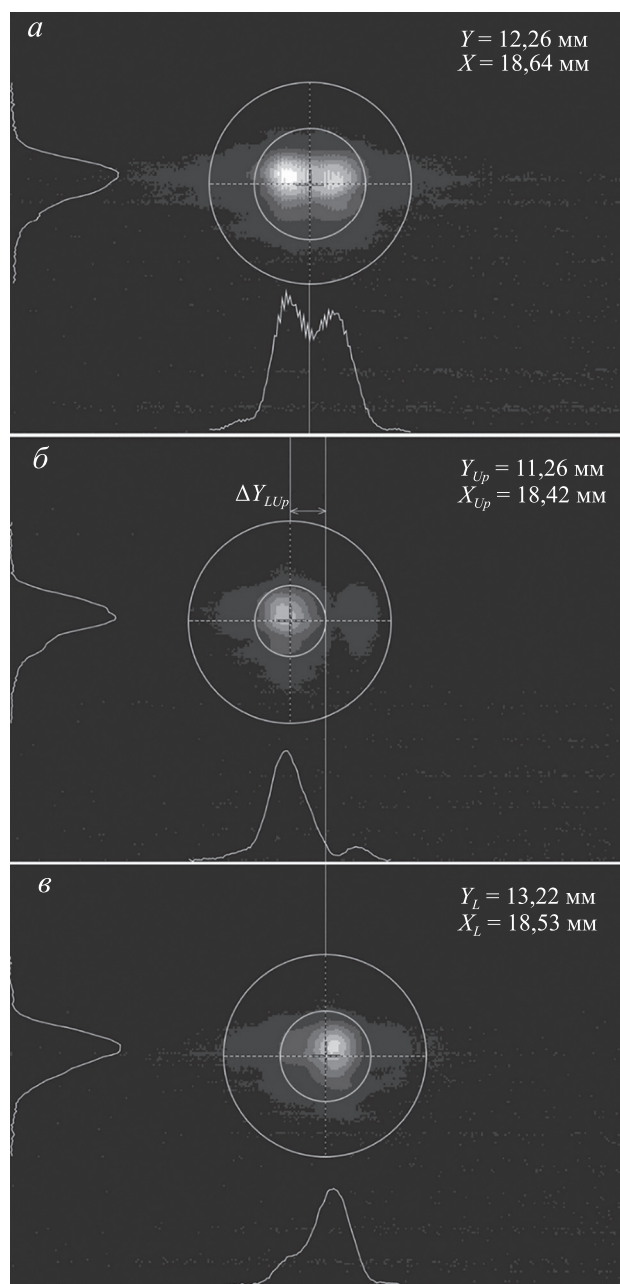


Рис. 4. Изображения поперечных сечений лазерных пучков: одновременно от двух зеркал (а); от нижнего зеркала (б) и от верхнего зеркала (в), где Y_{Up} , Y_L — координаты центра тяжести изображения в направлении его смещения, полученного от верхнего и нижнего зеркал соответственно; ΔY_{LUp} — разница координат центров тяжести изображений от верхнего и нижнего зеркал; X_{Up} , X_L — вторая координата центра тяжести изображения в плоскости анализа, полученного от верхнего и нижнего зеркал соответственно

координат изображений на матричном фотоприемнике. Погрешность регистрации координат изображений во многом зависит от флуктуаций мощности лазерного излучения. К качеству формы параболического зеркала не предъявляется высоких требований. Погрешность установки плоских диагональных зеркал имеет весьма незначительный вклад в суммарную ошибку. Зеркала могут быть выставлены параллельно друг другу с по-

грешностью 2–3" с использованием визуального автоколлиматора.

Заключение

Таким образом, предложенная методика может успешно использоваться при юстировке лазерных локационных систем с точностью, достаточной для большинства практических применений. Согласно описанной процедуре лазер и телескопическая система локационной системы юстируются совместно, что

исключает ошибки при установке двух этих компонентов друг относительно друга. При работе не требуется выполнение относительно трудоемких последовательных измерений размеров сфокусированного лазерного пучка в различных сечениях в окрестности фокальной плоскости коллиматорного объектива и последующих расчетов. Также исключено влияние флуктуаций энергии или мощности лазерного излучения, что особенно важно при юстировке систем с импульсно-периодическими лазерами с пассивным затвором.

Литература

1. Климков Ю.М. Оптическая система для формирования лазерных пучков с постоянным размером перетяжки на различных расстояниях от лазера // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1990. № 6. С. 90–95.
2. Климков Ю.М. Сравнение коллимирующих и фокусирующих лазерных оптических систем // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1993. № 1-2. С. 172–176.
3. Аникст Д.А., Голубовский О.М., Петрова Г.В., Фельдман Г.А. Оптические системы геодезических приборов. М.: Недра, 1981. 240 с.
4. Дубовик А.С., Апенко М.И., Дурейко Г.В., Жилкин А.М., Запругаева Л.А., Романов Д.А., Свешникова И.С. Прикладная оптика: учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1982. 612 с.
5. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
6. Айхлер Ю., Айхлер Г.И. Лазеры. Исполнение, управление, применение: пер. с нем. М.: Техносфера, 2012. 496 с.
7. Буряк О.В., Ястребков А.Б. Мощный импульсно-периодический лазер Nd³⁺-YAG лазер с комбинированной накачкой диодными матрицами // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2009. № 12. С. 12–16. doi: 10.3103/S1068335609120033
8. Венедиктов А.З., Ястребков А.Б., Буряк О.В. Твердотельный лазер с диодной накачкой. Патент RU 2361342 С1. Бюл. 2009. № 19.
9. Нужин В.С., Солк С.В., Нужин А.В. Метод фокусировки лазерного телескопического расширителя в ИК области спектра // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 2. С. 25–27.
10. Lashmanov O.U., Nuzhin A.V. Application of CCDs matrix for alignment of optoelectronic devices with lasers // IEEE Photonics Technology Letters. 2015. V. 27. N 15. P. 1636–1638. doi: 10.1109/LPT.2015.2432912
11. Березин В.В., Цыцулин А.К. Обнаружение и оценивание координат изображений точечных объектов в задачах астронавигации и адаптивной оптики // Вестник ТОГУ. 2008. № 1. С. 11–20.
12. Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками // Наука и техника. 2015. № 5. С. 71–76.
13. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пурыев Д.Т. Оптические измерения: учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
14. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: учеб. пособие для вузов / под ред. В.Н. Рождествина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.

Авторы

Пронин Вячеслав Викторович — начальник стенда, АО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения», Сосновый Бор, 188540, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-4812-5227, wwp-niiki@rambler.ru

References

1. Klimkov Yu.M. Laser optical system with a constant waist size at different distances from the laser. *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotosurveying»*, 1990, no. 6, pp. 90–95. (in Russian)
2. Klimkov Yu.M. Comparison of collimating and focusing laser optical systems. *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotosurveying»*, 1993, no. 1-2, pp. 172–176. (in Russian)
3. Anikst D.A., Golubovskii O.M., Petrova G.V., Feldman G.A. *Optical systems of survey instruments*. Moscow, Nedra Publ., 1981, 240 p. (in Russian)
4. Dubovik A.S., Apenko M.I., Dureiko G.V., Zhilkin A.M., Zapriagaeva L.A., Romanov D.A., Svешnikova I.S. *Applied Optics. Tutorial*. Moscow, Nedra Publ., 1982, 612 p. (in Russian)
5. Klimkov Yu.M. *Applied Laser Optics*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 128 p. (in Russian)
6. Eichler J., Eichler H.-J. *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer, 2010, 490 p.
7. Buriak O.V., Iastrebkov A.B. High-power repetitively pulsed Nd³⁺-YAG laser with combined pumping by diode arrays. *Kratkie soobshchenia po fizike*, 2009, no. 12, pp. 12–16. (in Russian). doi: 10.3103/S1068335609120033
8. Venediktov A.Z., Jastrebkov A.B., Burjak O.V. Solid diode-pumped laser. *Patent RU2361342 C1*, 2009. (in Russian)
9. Nuzhin V.S., Solk S.V., Nuzhin A.V. Method of adjusting a laser telescopic expander in the IR region. *Journal of Optical Technology*, 2004, vol. 71, no. 2, pp. 84–86. doi: 10.1364/JOT.71.000084
10. Lashmanov O.U., Nuzhin A.V. Application of CCDs matrix for alignment of optoelectronic devices with lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, vol. 27, no. 15, pp. 1636–1638. doi: 10.1109/LPT.2015.2432912
11. Beresin V.V., Tsytsulin A.K. Revelation and evaluation of coordinates of point object images in problems of astronavigation and adaptive optics. *Bulletin of PNU*, 2008, no. 1, pp. 11–20. (in Russian)
12. Starasotnikau M.A., Feodortsau R.V. Estimation of accurate determination for coordinates of gravity energy center in collimator test-object in respect of control schemes for optoelectronic devices with matrix photodetectors. *Science & technique*, 2015, no. 5, pp. 71–76. (in Russian)
13. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puriaev D.T. *Optical Measurements. Tutorial*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 264 p. (in Russian)
14. Kozintcev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Optoelectronic Environmental Monitoring Systems. Tutorial*. Moscow, BMSTU Publ., 2002, 528 p. (in Russian)

Authors

Vyacheslav V. Pronin — Stand Supervisor, JSC Research Institute of Optical and Electronic Instrumentation, Sosnovy Bor, 188540, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-4812-5227, wwp-niiki@rambler.ru