

Расчёт параметров призмного дефлектора лазерного сканера

И.Е. Гусаров, А.И. Калугин, М.Ю. Альес, Е.А. Антонов

Удмуртский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 11.02.2022

Принята к печати 12.01.2023

Призмный дефлектор, представляющий собой многогранную призму с отражающими гранями, является наиболее распространённым сканирующим элементом, который позволяет производить быстрое заполнение широкой области сканирования импульсами лазерного излучения по одной координате. Параметры призмного дефлектора связаны с характеристиками лазерного излучения, параметрами сканируемой области и положением дефлектора, а также ограничены различными факторами, например, требованиями безопасности или временем сканирования. Целью работы являлся анализ взаимосвязи параметров сканирующей системы (таких как угол подачи излучения на грань призмного дефлектора, диаметр лазерного пучка) с конструктивными параметрами её сканирующего элемента – призмного дефлектора.

Рассмотрен вариант расчёта частоты следования лазерных импульсов через количество лазерных пятен и их коэффициент перекрытия. Предложен метод расчёта характеристик призмного дефлектора, исходя из внешних параметров, таких как угол подачи излучения на грань и ширины гауссова пучка на выходе из оптической системы с размерами, безопасными для человеческого глаза. Приведены параметры призмных дефлекторов в зависимости от числа отражающих граней. Показана зависимость размера дефлектора от угла подачи излучения на отражающую грань.

При проектировании призмного дефлектора лазерного сканера, предназначенного для заполнения некоторой области сканирования с требуемым угловым размером σ , варьируя такие параметры как количество граней m и угол подачи α , можно добиться оптимальных для поставленной задачи характеристик дефлектора и режима сканирования.

Ключевые слова: лазерное сканирование, сканер, призмный дефлектор, сканирующая система.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61

Адрес для переписки:

Гусаров И.Е.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия
e-mail: gusarovie@udman.ru

Address for correspondence:

Gusarov I.E.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: gusarovie@udman.ru

Для цитирования:

И.Е. Гусаров, А.И. Калугин, М.Ю. Альес, Е.А. Антонов.
Расчёт параметров призмного дефлектора лазерного сканера.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 1. – С. 54–61.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61

For citation:

I.E. Gusarov, A.I. Kalugin, M.Yu. Alyes, E.A. Antonov.
[Calculation of Parameters of Prism Deflector for Laser Scanner].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 1, pp. 54–61 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61

Calculation of Parameters of Prism Deflector for Laser Scanner

I.E. Gusarov, A.I. Kalugin, M.Yu. Alyes, E.A. Antonov

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 11.02.2022

Accepted for publication 12.01.2023

Abstract

The prism deflector which is a multifaceted prism with reflective facets is the most common scanning element that allows to quickly fill a wide scanning area with laser radiation pulses along one coordinate. The parameters of a prismatic deflector are related to the characteristics of the laser radiation of the scanned area parameters and of the deflector position, and are also limited by various factors, such as safety requirements or scanning time. The aim of this work was to analyze the relationship between the external operating conditions of a laser scanning system and the internal design parameters of a prism deflector.

A variant of calculating of laser pulses frequency by the number of spots and their overlap coefficient is considered. A method for calculating of a prism deflector characteristics based on external parameters, such as the angle of incidence of radiation to the facet and the width of the Gaussian beam with dimensions that are safe for a human eye is proposed. Prismatic deflectors parameters are proposed depending on the number of reflecting facets. Dependence of a deflector size on the angle of radiation incidence to the reflecting face is shown.

When designing a prismatic deflector of a laser scanner used to fill a certain scanning area with the required angular size σ by varying such parameters as the number of faces m and the feed angle α it is possible to achieve optimal deflector characteristics and scanning mode for the task.

Keywords: laser scanning, scanner, prismatic deflector, scanning system.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61

Адрес для переписки:

Гусаров И.Е.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия
e-mail: gusarovie@udman.ru

Address for correspondence:

Gusarov I.E.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: gusarovie@udman.ru

Для цитирования:

И.Е. Гусаров, А.И. Калугин, М.Ю. Альес, Е.А. Антонов.
Расчёт параметров призматического дефлектора лазерного сканера.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 1. – С. 54–61.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61

For citation:

I.E. Gusarov, A.I. Kalugin, M.Yu. Alyes, E.A. Antonov.
[Calculation of Parameters of Prism Deflector for Laser Scanner].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 1, pp. 54–61 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61

Введение

Лазерное сканирование широко применяется для решения самых разных задач в промышленности, архитектуре, медицине, геодезии, транспорте [1–4]. Ключевой проблемой лазерного сканирования является последовательное зондирование сканируемого пространства с заданными угловыми размерами импульсным лазерным излучением. Данный вопрос подробно рассмотрен в работе [5]. В зависимости от внешних условий к лазерным сканерам предъявляются разные требования. В связи с этим существует много видов сканеров с различным принципом действия: отражательные (с осциллирующим или вращающимся дефлектором), преломляющие, голографические, акусто- и электрооптические [6, 7]. Каждый из видов сканеров обладает определёнными достоинствами и недостатками. Одним из самых распространённых оптомеханических элементов является призмный (полигональный) дефлектор (ПД), с помощью которого осуществляется заполнение сканируемого пространства по одной координате. Его преимуществами являются быстрота и возможность сканирования широких полей.

Призмный дефлектор представляет собой вращающуюся многогранную призму с отражающими гранями, выполненную из стекла, металла или пластика с технологическим отверстием для крепления элемента на ось вращения. В большинстве работ анализ параметров ПД производился при условии падения коллимированного лазерного пучка с заданным диаметром в заданную точку грани ПД [8–10]. В работе [11] предложен усовершенствованный метод расчёта ПД с учётом расходимости пучка. В работе [12] показано, что при произвольном выборе места падения пучка на грань возникает проблема обратного отражения части пучка. Для исправления этого недостатка необходимо ограничить диапазон возможных положений коллимирующего объектива относительно ПД. Но при этом увеличивается та часть грани ПД, которая оказывается не используемой.

Еще одной проблемой является однородность распределения пятен по сканируемому полю. Как показано в работах [13, 14], распределение лазерных пятен в плоскости сканирования

оказывается неравномерным. Более того, форма поперечного сечения пучка также претерпевает изменения. Частично эта проблема решается применением специальных объективов с F - $Theta$ линзами, но только на малых расстояниях. Кроме того, при сканировании двумерного поля требуется синхронизация времени испускания импульсов с вращением ПД, чтобы совпадало положение первых пятен каждой строки [15]. Таким образом, параметры ПД оказываются связаны с характеристиками лазерного излучения (диаметр пучка, частота импульсов, угол подачи излучения), положением и угловым размером сканируемого поля. Однако не учтено, что сами эти параметры могут быть ограничены различными факторами, например, требованиями безопасности лазерного излучения при сканировании в открытом пространстве (геодезия, архитектура, транспорт, экология и др.) или временем сканирования (системы сканирования в режиме реального времени). Подобные ограничения требуют нахождения оптимальных значений параметров ПД.

Целью настоящей работы являлся анализ взаимосвязи параметров сканирующей системы (таких как угол подачи излучения на грань ПД, диаметр лазерного пучка) с конструктивными параметрами её сканирующего элемента – призмного дефлектора.

Параметры призмного дефлектора

Основными параметрами ПД являются количество отражающих граней m , относительная длительность цикла или коэффициент полезного использования грани C [6, 7], угол подачи лазерного излучения на грань α , расстояние от центра отражающей грани до точки подачи излучения s , радиус вписанной окружности R и ширина грани h (рисунок 1). К внешним условиям можно отнести требуемый угол сканирования σ , энергетический диаметр пучка D (под энергетическим радиусом пучка $w = D/2$ будем понимать расстояние от оси пучка до точки, в которой интенсивность пучка падает в e раз), качество сканирования пространства, определяемое степенью заполнения пространства лазерными пятнами, расстояние до зондируемого пространства l , время построения отдельной строки t_l .

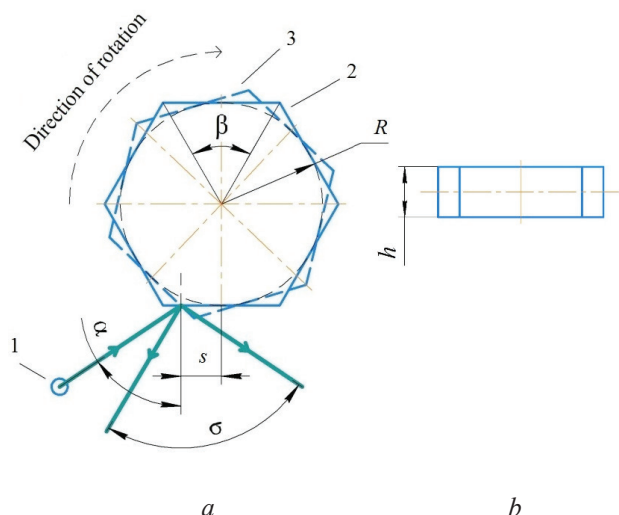


Рисунок 1 – Схема работы сканера с призматическим дефлектором: 1 – лазер; 2 – призматический дефлектор в начальном и 3 – в конечном положениях (а); призматический дефлектор (вид сбоку) (b)

Figure 1 – Scheme of operation of the scanner with prismatic deflector: 1 – laser; 2 – prismatic deflector in the initial position; 3 – prismatic deflector in the final position (a); prismatic deflector (side view) (b)

При лазерном зондировании важную роль играет распределение лазерных импульсов в пространстве. От этого распределения зависит качество и быстрота сканирования. Очевидно, что при увеличении числа импульсов и плотности их расположения возрастает степень детализации зондируемого пространства, но также это приводит к росту частоты испускания импульсов и повышению требований к точности изготовления сканирующих элементов. Степень заполнения пространства можно оценить с помощью коэффициента перекрытия пятен η . Под коэффициентом перекрытия лазерных пятен будем понимать отношение длины перекрытия x двух соседних пятен к диаметру лазерного пятна в плоскости сканирования D_l (рисунок 2):

$$\eta = \frac{x}{D_l}.$$

В случае отсутствия перекрытия расстояние x становится отрицательным. При увеличении длины перекрытия лазерных пятен и, как следствие, коэффициента перекрытия η , уменьшается площадь слепой зоны и повышается качество сканирования.

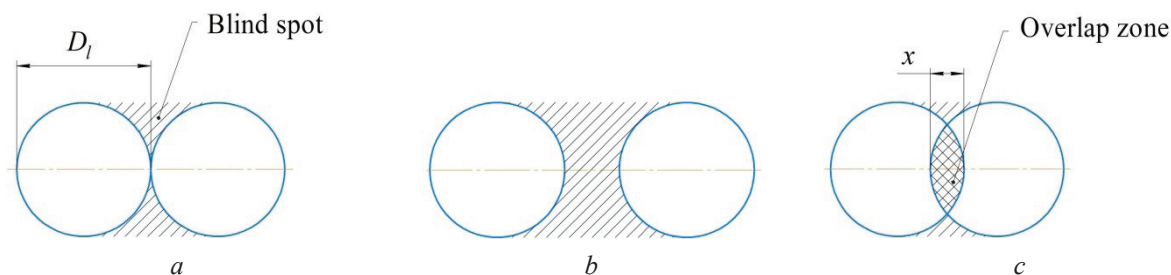


Рисунок 2 – Варианты перекрытия лазерных пятен: а – касающиеся пятна; б – пятна лазерного излучения без перекрытия; с – пятна лазерного излучения с перекрытием

Figure 2 – Options for overlapping laser spots: a – touching spots; b – laser spots without overlap; c – laser spots with overlap

Полное число лазерных импульсов для построения строки равно:

$$N = \frac{l\sigma}{D_l(1-\eta)},$$

а частота следования импульсов:

$$v = \frac{N}{t_l}.$$

Диаметр лазерного пучка D на выходе из сканирующей системы может значительно отличаться от D_l , особенно при больших

расстояниях l . Чаще всего внутри лазерного сканирующего устройства применяется гауссов пучок в ближней зоне. Тогда вне устройства на малых расстояниях зондирования расходимостью пучка можно пренебречь и считать диаметр пучка равным его диаметру на выходе из оптической системы. Так как расходимость лазерного пучка, как правило, очень мала, то наиболее опасной с точки зрения лазерной безопасности следует считать область вблизи лазерной установки, так как диаметр пучка в данном случае является наименьшим,

а плотность мощности излучения наибольшей. Поэтому минимально допустимый размер ширины пучка w ограничивается требованиями безопасного воздействия лазерного излучения на человека. Исходя из предельно допустимой мощности лазерного излучения P_{\max} и мощности гауссова пучка, заключённой в некотором радиусе R_0 , равном радиусу облучённого участка, очевидно неравенство:

$$P_{\max} \geq P_{\text{laser}} \left(1 - e^{-\frac{R_0^2}{w^2}} \right), \quad (1)$$

где P_{laser} – полная мощность пучка.

Так как наиболее сильному воздействию подвержены глаза человека, то в качестве R_0 обычно берётся радиус зрачка глаза. Из соотношения (1) безопасная ширина лазерного пучка определяется как:

$$w \geq R_0 \sqrt{\ln \left(\frac{1}{\frac{P_{\text{laser}}}{P_{\text{laser}} - P_{\max}}} \right)}.$$

Практически ширина грани ПД должна быть больше w , так как на краях может происходить дифракция пучка. Если обозначить потери мощности лазерного излучения на краях как δ , то ширину грани можно оценить с помощью соотношения:

$$h = 2w \sqrt{\ln \frac{1}{\delta}}.$$

При вращении ПД возникают положения призмы, когда лазерное пятно частично попадает на две соседние грани, вследствие чего наблюдаются два паразитных явления: обрезание части пучка, отражающегося от рабочей грани, и отражение в обратном направлении части пучка от соседней грани. Для решения проблемы обратного отражения применяются два метода. Как показано в работе [12], можно рассчитать такое начальное положение места падения пучка на грань, что обратно отражённое излучение будет направлено мимо объектива лазера. С другой стороны, можно срезать углы призмы дефлектора или покрыть матовой чёрной краской. В любом случае, происходит уменьшение полезной длины грани. Для учёта этого эффекта вводят коэффициент полезного использования,

который представляет собой отношение полезной длины грани к её полной длине:

$$C = \frac{L_{\text{ef}}}{L},$$

где L_{ef} – полезная длина грани; L – полная длина грани.

Приведённая формула мало применима к реальным расчётам призматического дефлектора. Это связано с тем, что параметр L_{ef} потребует точного определения, что затрудняется фактом постоянного изменения размера проекции лазерного пучка на отражающую грань ПД и, как следствие, коэффициента перекрытия пятен на грани. Поэтому удобнее связать коэффициент C с числом граней:

$$C = \frac{m\sigma}{4\pi}. \quad (2)$$

В то же время, из [6] известно, что минимальная длина грани дефлектора равна:

$$L = \frac{D'}{1-C}, \quad (3)$$

где $D' = h/\cos \alpha$ – максимальный размер проекции лазерного пятна диаметром h на грани ПД.

Зная длину граней и их количество, можно перейти к расчёту радиуса вписанной в ПД окружности R :

$$R = \frac{L}{2\text{tg}\left(\frac{\pi}{m}\right)}. \quad (4)$$

Крайнее положение пятна лазерного излучения на грани дефлектора можно определить как:

$$s = RC\text{tg}\frac{\beta}{2},$$

где $\beta = 2\pi/m$ – угол развёртки грани.

Помимо геометрических характеристик, стоит остановиться на таком параметре, как частота вращения призматического дефлектора вокруг своей оси на вале двигателя. Данную величину можно легко выразить через время построения одной строки:

$$v_p = \frac{1}{mt_l}.$$

Таким образом, исходя из внешних требований к размерам области сканирования и безопасности сканирования, при проектировании призматического дефлектора лазерного сканера однозначно и точно определяются все

его конструктивные параметры, кроме числа граней m . Однако для данного параметра существует верхняя граница значений, которая следует из выражения (2):

$$m < \frac{4\pi}{\sigma}. \quad (5)$$

Моделирование параметров призматического дефлектора

Рассмотрим влияние на параметры ПД внешних условий сканирования. Расчёты характеристик ПД при угле развёртки строки сканирования $\sigma = \pi/2$, угле подачи излучения $\alpha = \pi/3$, требуемой ширине грани $h = 5$ мм и времени построения строки сканирования $t_l = 1$ с приведены в таблице.

Видно, что при приближении количества граней к максимальному значению увеличивается коэффициент полезного использования грани, но одновременно с этим происходит увеличение габаритных размеров ПД и уменьшение частоты вращения. Коэффициент C определяет также время перехода с одной грани на другую, т. е. время перехода с одной строки сканирования на другую. При больших коэффициентах время перехода значительно сокращается, что может вызывать проблемы с кадровой развёрткой. Помимо этого, исходя из условия (5), следует, что при увеличении угла развёртки кадра уменьшается максимальное количество отражающих граней дефлектора. Также на габаритные размеры дефлектора влияет угол подачи лазерного излучения.

Рост значения угла падения α , как видно из соотношений (3) и (4), приводит к увеличению габаритных размеров дефлектора, что влияет на общую компоновку системы. Зависимость

величины радиуса вписанной окружности R от угла подачи излучения α при различных значениях m приведена на рисунке 3. Как видно из графика, при небольших значениях α габаритные размеры ПД изменяются незначительно. Однако при дальнейшем увеличении угла для дефлекторов с большим количеством граней наблюдается резкое увеличение радиуса вписанной окружности при приближении α к $\pi/2$. С другой стороны, при небольших значениях угла подачи α выходное окно лазера будет находиться в границах угла развёртки сканирования α , тем самым мешая построению строки. Следовательно, можно выделить нижнюю и верхнюю границы для значений α :

$$\frac{\sigma}{2} \leq \alpha \leq \arccos\left(\frac{1}{e} \cos \frac{\sigma}{2}\right).$$

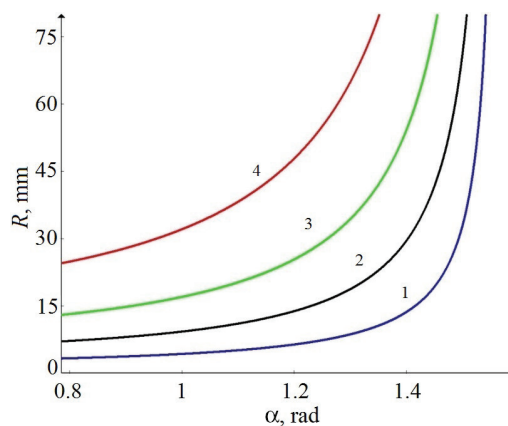


Рисунок 3 – Зависимость радиуса вписанной окружности R от угла подачи излучения α при различных значениях граней m : 1 – $m = 3$; 2 – $m = 4$; 3 – $m = 5$; 4 – $m = 6$

Figure 3 – Dependence of the value of the radius of the inscribed circle R on the angle of radiation supply α for various values of m : 1 – $m = 3$; 2 – $m = 4$; 3 – $m = 5$; 4 – $m = 6$

Таблица /Table

Результаты расчёта призматических дефлекторов

Results of calculation of prismatic deflectors

Количество граней Number of facets	Коэффициент полезного использования грани Coefficient beneficial use of facet	Длина грани, мм Face length, mm	Радиус вписанной окружности, мм Inscribed circle radius, mm	Частота вращения призматического дефлектора, Гц Rotation frequency of prism deflector, Hz
3	0.375	16	4.62	0.67
4	0.500	20	10	0.50
5	0.625	27	18	0.40
6	0.750	40	35	0.33
7	0.875	80	83	0.29

Таким образом, угол подачи α оказывается заметно ограничен. Особенно сильно это ограничение проявляется для ПД с большим количеством граней.

Заключение

Проведён анализ взаимосвязи параметров сканирующего устройства с конструктивными параметрами призматического дефлектора. При проектировании призматического дефлектора лазерного сканера, предназначенного для заполнения некоторой области сканирования с требуемым угловым размером σ , варьируя такие параметры как количество граней m и угол подачи α , можно добиться оптимальных для поставленной задачи характеристик дефлектора и режима сканирования.

Список использованных источников

1. Низаметдинов Н.Ф. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин / Н.Ф. Низаметдинов, П.А. Моисеев, И.Б. Воробьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 4(382). – С. 9–22.

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

2. Новиков В.В. Воздушное лазерное сканирование на базе БПЛА для изучения объектов археологии в Европейской части России / В.В. Новиков // Поволжская Археология. – 2022. – № 1(39). – С. 232–246.

DOI: 10.24852/pa2022.1.39.232.246

3. Калугин А.И. Лазерная локационная система обнаружения и распознавания малоразмерных объектов / А.И. Калугин, М.Р. Зарипов, Е.А. Антонов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 1. – С. 9–14.

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-9-14

4. Singh A. A comprehensive study of auxiliary arrangements for attaining omnidirectionality in additive manufacturing machine tools / A. Singh [et al.] // Journal of manufacturing science and engineering, 2020, vol. 143, pp. 050802-1–050802-17.

DOI: 10.1115/1.4049094

5. Соломатин В.А. Пространственно-частотные характеристики лазерных сканеров / В.А. Соломатин // Оптический журнал. – 2020. – Т. 87. – № 4. – С. 19–27.

DOI: 10.17586/1023-5086-2020-87-04-19-27

6. Marshall G.F. Handbook of optical and laser scanning, second edition / G.F. Marshall, G.E. Stutz // Taylor and Francis Group, 2014, 789 p.

7. Beiser L. Unified optical scanning technology / L. Beiser // John Wiley and Sons, 2003, 191 p.

8. Duma V.-F. Analysis of polygonal mirror scanning heads: from industrial to high-end applications in swept sources for OCT / V.-F. Duma // Proc. SPIE, Design and Quality for Biomedical Technologies X, 14 March 2017, vol. 10056, pp. 100560P-1–100560P-11.

DOI: 10.1117/12.2251023

9. Duma V.-F. Numerical and experimental study of the characteristic functions of polygon scanners / V.-F. Duma, M. Nicolov // Proc. SPIE, Modeling Aspects in Optical Metrology II, 17 June 2009, vol. 7390, pp. 739015-1–739015-9.

DOI: 10.1117/12.827443

10. Duma V.-F. Polygon mirror scanners in bio-medical imaging: a review / V.-F. Duma, A.G. Podoleanu // Proc. SPIE, Optical Components and Materials X, 11 March 2013, vol. 8621, pp. 86210V-1–86210V-9.

DOI: 10.1117/12.2005065

11. Varughese K. Flattening the field of postobjective scanners by optimum choice and positioning of polygons / K. Varughese, K. Krishna // Appl. Opt., 1993, vol. 32, pp. 1104–1108. DOI: 10.1364/AO.32.001104

12. Hoang H.-M. Non-back-reflecting polygon scanner with applications in surface cleaning / H.-M. Hoang // Opt. Express, 2021, vol. 29, pp. 32939–32950.

DOI: 10.1364/OE.438850

13. Li Y. Asymmetric distribution of the scanned field of a rotating reflective polygon / Y. Li, J. Katz // Appl. Opt., 1997, vol. 36, pp. 342–352.

DOI: 10.1364/AO.36.000342

14. Артамонов С.И. Выбор сканера для лазерной локационной системы / С.И. Артамонов [и др.] // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83. – № 9. – С. 51–58.

15. De Loor R. Polygon Scanner System for Ultra Short Pulsed Laser Micro-Machining Applications / R. De Loor // Physics Procedia, 2013, vol. 41, pp. 544–551. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.114

References

1. Nisametdinow N.F., Moiseev P.A., Vorobiev I.B. [Laser scanning and aerial photography with UAV in studying the structure of forest-tundra stands in the Khibiny Mountains]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 9–22 (in Russian).

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

2. Novikov V.V. [UAV lidar investigation archeology sites in European part of Russia]. *Povolzhskaya arheologiya* [The Volga River region archeology], 2022, no. 1, pp. 232–246 (in Russian).

DOI: 10.24852/pa2022.1.39.232.246

3. Kalugin A.I., Zaripov M.R., Antonov E.A. [Laser locator for detection and recognition of small objects]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Manufacturing], 2020, vol. 18, no. 1, pp. 9–14 (in Russian). **DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-1-9-14
4. Singh A., Negi S., Kapil S., Karunakaran K.P., Das M. A comprehensive study of auxiliary arrangements for attaining omnidirectionality in additive manufacturing machine tools. *Journal of manufacturing science and engineering*, 2020, vol. 143, pp. 050802-1–050802-17. **DOI:** 10.1115/1.4049094
5. Solomatina V.A. [Spatial-frequency characteristics of laser scanners]. *Opticheskij zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2020, vol. 87, no. 4, pp. 19–27 (in Russian). **DOI:** 10.17586/1023-5086-2020-87-04-19-27
6. Marshall G.F., Stutz G.E. Handbook of optical and laser scanning, second edition. Taylor and Francis Group, 2014, 789 p.
7. Beiser L. Unified optical scanning technology. John Wiley and Sons, 2003, 191 p.
8. Duma V.-F. Analysis of polygonal mirror scanning heads: from industrial to high-end applications in swept sources for OCT. *Proc. SPIE, Design and Quality for Biomedical Technologies X*, 14 March 2017, vol. 10056, pp. 100560P-1–100560P-11. **DOI:** 10.1117/12.2251023
9. Duma V.-F., Nicolov M. Numerical and experimental study of the characteristic functions of polygon scanners. *Proc. SPIE, Modeling Aspects in Optical Metrology II*, 17 June 2009, vol. 7390, pp. 739015-1–739015-9. **DOI:** 10.1117/12.827443
10. Duma V.-F., Podoleanu A.G. Polygon mirror scanners in biomedical imaging: a review. *Proc. SPIE, Optical Components and Materials X*, 11 March 2013, vol. 8621, pp. 86210V-1–86210V-9. **DOI:** 10.1117/12.2005065
11. Varughese K., Krishna K. Flattening the field of postobjective scanners by optimum choice and positioning of polygons. *Appl. Opt.*, 1993, vol. 32, pp. 1104–1108. **DOI:** 10.1364/AO.32.001104
12. Hoang H.-M., Choi S., Park C., Choi J., Ahn S.H., Noh J. Non-back-reflecting polygon scanner with applications in surface cleaning. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, pp. 32939–32950. **DOI:** 10.1364/OE.438850
13. Li Y., Katz J. Asymmetric distribution of the scanned field of a rotating reflective polygon. *Appl. Opt.*, 1997, vol. 36, pp. 342–352. **DOI:** 10.1364/AO.36.000342
14. Artamonov S.I., Gryaznov N.A., Kuprenyuk V.I., Romanov N.A., Sosnov E.N. [Choosing a scanner for a laser location system]. *Opticheskij zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2016, vol. 83, no. 9, pp. 51–58 (in Russian).
15. De Loor R. Polygon Scanner System for Ultra Short Pulsed Laser Micro-Machining Applications. *Physics Procedia*, 2013, vol. 41, pp. 544–551. **DOI:** 10.1016/j.phpro.2013.03.114