

УДК 528.8.042

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-37-46

Метод расчета сканирующего блока лазерного сканера и оптимизация его габаритных размеров

И. Е. Гусаров, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

А. И. Калугин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

Е. А. Антонов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

В. Ю. Трубицын, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

Призмный дефлектор, представляющий собой многогранную призму с отражающими гранями, является наиболее распространенным сканирующим элементом, который позволяет производить быстрое заполнение широкой области сканирования импульсами лазерного излучения по одной координате. Для осуществления перемещения лазерного излучения по второй координате исследуемой области следует применять второй элемент сканирования, например, плоское качающееся зеркало. Габаритные размеры элементов сканирования и сканирующего блока в целом зависят от свободных параметров, которые задаются на этапе разработки системы.

В работе предложена математическая модель, предназначенная для автоматизированного расчета сканирующего блока, состоящего из призмного дефлектора, неподвижного плоского зеркала, качающегося плоского зеркала и выходного окна лазера. Описанная модель позволяет провести расчет габаритных параметров оптических элементов системы и компоновки блока с использованием требуемых характеристик сканируемой области и свободных параметров, к которым относятся: угол подачи излучения на грань призмного дефлектора, угол наклона неподвижного зеркала и одной из координат положения выходного окна лазера относительно центра призмного дефлектора. При этом первые два названных параметра представляют наибольший интерес с точки зрения минимизации и оптимизации габаритных размеров сканирующих элементов и сканирующего блока в целом.

На основании приведенной модели осуществлен анализ зависимости габаритных размеров элементов сканирования и сканирующего блока в целом, в результате которого получены диапазоны оптимальных значений таких свободных параметров, как угол подачи лазерного излучения на грань призмного дефлектора α и угол наклона неподвижного зеркала σ , позволяющие минимизировать габаритный размер сканирующего блока. Полученные результаты можно использовать при разработке автоматизированных систем проектирования лазерных сканирующих устройств, что позволит значительно упростить и ускорить процесс разработки сканирующих устройств на базе двух сканирующих элементов – призмного дефлектора и качающегося зеркала.

Ключевые слова: сканер, сканирующая система, параметры сканирующей системы, оптимизация параметров, призмный дефлектор.

Введение
В настоящее время лазерное сканирование нашло широкое применение в различных областях деятельности человека – геодезии, промышленности, архитектуре, медицине, транспорте [1–5]. Суть лазерного сканирования заключается в последовательном заполнении изучаемой области с заданными угловыми размерами импульсами лазерного излучения и получения отклика от объектов, нахо-

дящихся в этой области. Существует проблема, связанная с необходимостью разработки дешевых и компактных лазерных сканеров, но при этом способных обеспечить возможность зондирования широких полей с высокой скоростью. Характеристики лазерного сканера во многом зависят от используемых элементов сканирования, называемых также дефлекторами. Сканирующие элементы можно разделить по принципу действия на следующие виды:

отражательные, преломляющие, голографические, акусто- и электрооптические [6, 7]. Из всего многообразия сканирующих элементов выделяются наиболее часто применяемые полигональные дефлекторы и качающиеся зеркала, что связано с большим значением максимального угла отклонения лазерного излучения и высокой скоростью сканирования [8].

Существует несколько типов полигонального дефлектора: призмный (ПД) (выполненный в виде правильной полигональной призмы) и пирамидальный (выполненный в виде усеченной пирамиды). Принцип работы таких дефлекторов во многом идентичен, однако существует различие в ориентации оптической оси лазерного пучка относительно отражающей грани сканирующего элемента. 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 случае призмного дефлектора оптическая ось лазерного источника расположена перпендикулярно оси вращения дефлектора и ориентирована к отражающей грани под некоторым углом. В свою очередь, при использовании пирамидального дефлектора оптическая ось лазерного источника располагается параллельно оси вращения элемента сканирования на некотором расстоянии от нее. При равных требованиях к угловому размеру сканируемой области и времени сканирования призмный дефлектор должен обладать вдвое большим количеством отражающих граней и вдвое меньшей скоростью вращения по сравнению с элементом пирамидальной формы [9].

В работах [10, 11] приведены расчеты основных параметров призмного дефлектора. Особого внимания заслуживает коэффициент полезного использования грани, необходимость введения которого обоснована в работе [12]. Данный параметр позволяет ограничить положение выходного окна лазерного источника относительно отражающей грани ПД, что решает проблему с паразитными отражениями, возникающими при попадании лазерного излучения на стык граней, но увеличивает габаритный размер дефлектора за счет неиспользуемой части грани.

Качающееся зеркало является оптимальным вариантом для использования в качестве второго сканирующего элемента, предназначенного для заполнения кадра сканирования по второй координате, ввиду своей дешевизны и предельной простоты исполнения. В работах [13–15]

приведен метод расчета сканирующих систем на основе качающегося зеркала.

Актуальность создания сканирующих устройств, построенных на базе нескольких сканирующих элементов, обозначена в работе [16]. В работе [17] приведен анализ комбинированных устройств, в которые вошли оптико-механические, электронные, акустооптические, электрооптические сканаторы, а также микро-электро-механические (MEMS) системы с учетом широкого набора параметров и характеристик, таких как быстродействие, разрешение, точность управления оптическим пучком, размеры сканируемого пространства и др. Однако, несмотря на все преимущества комбинированных систем, на текущий момент отсутствуют работы, посвященные математическим моделям, предназначенным для проектирования такого рода устройств.

Существуют работы [например, 18–22], в которых оптимизация параметров лазерного сканера проводится с точки зрения принимаемой мощности излучения лазера, отраженного от объекта и попадающего на фоточувствительную площадку ФПУ, при решении конкретной задачи. При этом вопрос, связанный с оптимальными габаритными размерами сканирующего устройства, не затрагивается.

Как было сказано ранее, задача минимизации размера лазерного сканера является важной проблемой. Габаритный размер элементов сканирования и сканирующей системы в целом зависит как от параметров сканирования, так и от различных свободных параметров, используемых при расчете компоновки оптических элементов в устройстве. Так, в работе [23] рассмотрена зависимость размера призмного дефлектора от количества отражающих граней, которая показывает, что при увеличении углового размера сканируемой области увеличиваются габаритные размеры дефлектора.

Целью данной работы является построение математической модели, предназначенной для расчета взаимного расположения элементов в сканирующем блоке, а также рассмотрение зависимости габаритных размеров сканирующих элементов и устройства в целом от внешних условий работы и свободных параметров, задаваемых при расчете компоновки сканирующего блока.

Решение данных задач необходимо для создания автоматической системы проектирования, предназначенной для разработки сканирующих систем и оптимизации их габаритных размеров, что значительно ускорит и удешевит разработку

сканирующих устройств, построенных на базе призмного дефлектора и качающегося зеркала. Кроме того, создание малоразмерных сканеров критически необходимо для некоторых областей применения, таких как сканирование с помощью беспилотных летательных аппаратов.

Математическая модель для расчета компоновки сканирующего блока

Помимо призмного дефлектора и плоского качающегося зеркала в сканирующий блок может входить вспомогательное неподвижное зеркало, предназначенное для транспортировки лазерного излучения между сканирующими элементами. Потребность в дополнительном зеркале возникает при необходимости сканирования пространства с широким азимутальным углом. В конфигурации сканирующего блока, состоящего только из двух элементов, при приближении качающегося зеркала к конечному положению возникает риск попадания лазерного пятна в торец зеркала, что будет приводить к искажению строящегося кадра и возникновению паразитных отражений внутри системы.

Последовательно рассмотрим схему расчета компоновки сканирующего блока, состоящего из призмного дефлектора, неподвижного плоского зеркала и качающегося плоского зеркала. Расположение выходного окна лазера и неподвижного плоского зеркала относительно центра ПД показано на рисунке 1.

Лазерный пучок после выхода из окна L попадает на грань полигональной призмы с радиусом вписанной окружности R под углом α относительно нормали к грани на расстоянии s от центра полигонального зеркала по оси X . Размеры x_L и y_L – это расстояния от лазера до центра полигонального зеркала по осям X и Y соответственно. Центр плоского неподвижного зеркала M_1 находится на биссектрисе угла сканирования θ , формируемого при отражении лазерного излучения от грани ПД, вращающегося из начального положения P_1 в конечное положение P_2 . Расстояние от центра M_1 до грани дефлектора равно H_1 . При этом неподвижное зеркало расположено перпендикулярно биссектрисе угла сканирования под углом γ к оси абсцисс. Положение центра неподвижного зеркала относительно центра ПД описывается расстояниями x_1 и y_1 . Длина зеркала M_1 в геометрическом приближении обозначена как L_1 .

При расчете положения выходного окна лазера и плоского неподвижного зеркала свободными параметрами являются координата x_L , расстояние H_1 и угол α .

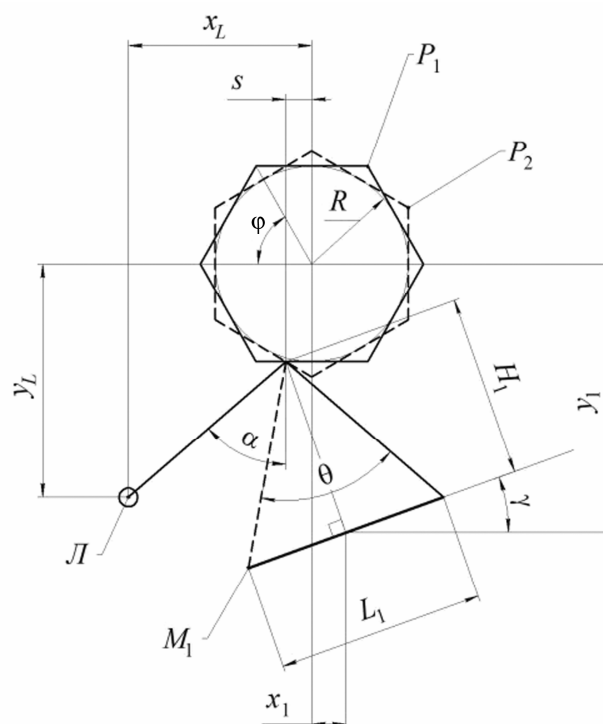


Рис. 1. Расположение выходного окна лазера и плоского неподвижного зеркала относительно центра ПД: L – выходное окно лазера; M_1 – плоское неподвижное зеркало; P_1 – начальное положение ПД; P_2 – конечное положение ПД

Fig. 1. Location of the output window of the laser and a flat fixed mirror relative to the center of the PD: L – output window of the laser; M_1 – flat fixed mirror; P_1 – initial position of the PD; P_2 – final position of PD

Расстояние s рассчитывается как

$$s = RC \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right),$$

где $\varphi = 2\pi/m$ – угол развертки грани; m – количество отражающих граней ПД; C – коэффициент полезного использования грани. Зная параметры полигональной призмы, угол падения пучка на грань, можно рассчитать расстояние y_1 , предварительно задав x_L :

$$y_L = \frac{x_L - s}{\operatorname{tg}(\alpha)} + R.$$

При этом, чтобы избежать наложения оптических элементов друг на друга, должно выполняться условие

$$x_L^2 + y_L^2 > R_{op}^2 + R_l^2,$$

где R_l – характерный размер объектива лазера; R_{op} – радиус описанной окружности полигонального зеркала. Таким образом, варьируя значения x_L и α можно найти оптимальное расстоя-

ние y_L и, как следствие, оптимальное расположение центра полигонального зеркала относительно лазера. Однако при значении угла α меньше половины требуемого угла развертки выходное окно лазера будет попадать в границы угла θ и перекрывать зону сканирования. Поэтому возникает условие, ограничивающее величину угла α :

$$\alpha > \frac{\theta}{2}.$$

Длина неподвижного зеркала в геометрическом приближении рассчитывается как

$$L_1 = 2H_1 \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

Однако эта формула не учитывает конечные размеры лазерного пучка, наличие разъюстировок оптических осей и возможные краевые эффекты, возникающие при попадании пучка на край грани ПД. Поэтому реальный размер зеркала определяется как

$$L_{1r} = \left(2H_1 \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) + D'\right)K,$$

где K – коэффициент запаса; $D' = D/\cos(\alpha)$ – диаметр максимальной проекции лазерного пятна на грани ПД.

Угол наклона зеркала γ относительно оси абсцисс определяется как

$$\gamma = \alpha - \frac{\theta}{2}.$$

Расстояния x_1 и y_1 от центра полигонального зеркала до середины плоского неподвижного зеркала вычисляются следующим образом:

$$x_1 = \frac{H_1 \sin(\alpha)}{\cos(\theta/2)} - s - \frac{L_1}{2} \cos(\gamma);$$

$$y_1 = \frac{H_1 \cos(\alpha)}{\cos(\theta/2)} + R + \frac{L_1}{2} \sin(\gamma).$$

Для расчета положения центра плоского качающегося зеркала относительно центра ПД обратимся к рисунку 2.

Длина плоского качающегося зеркала в геометрическом приближении находится как

$$L_2 = 2(H_1 + H_2) \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

где H_2 – расстояние между зеркалами в рассматриваемой плоскости, которое является

свободным параметром. С учетом размеров пучка, разъюстировок и краевых эффектов реальный размер зеркала определяется следующим образом:

$$L_{2r} = \left(2(H_1 + H_2) \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) + D'\right)K.$$

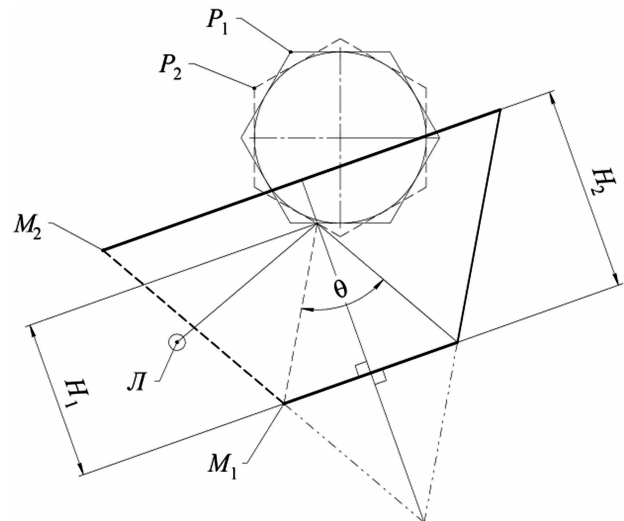


Рис. 2. Расположение центра качающегося зеркала относительно центра неподвижного плоского зеркала: L – выходное окно лазера; M_1 – плоское неподвижное зеркало; M_2 – плоское качающееся зеркало; P_1 – начальное положение ПД; P_2 – конечное положение ПД

Fig. 2. The location of the center of the oscillating mirror relative to the center of the fixed flat mirror: L – output window of the laser; M_1 – flat fixed mirror; M_2 – flat oscillating mirror; P_1 – initial position of the PD; P_2 – final position of PD

Рассмотрим расположение зеркал в другой плоскости (вид сбоку) (рис. 3).

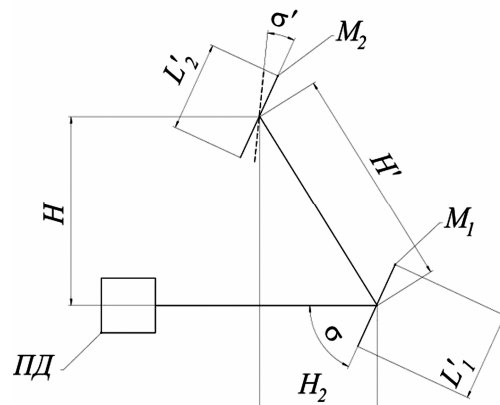


Рис. 3. Схематическое расположение элементов сканирующего блока в другой плоскости (вид сбоку): ПД – полигональный дефлектор; M_1 – плоское неподвижное зеркало; M_2 – плоское качающееся зеркало

Fig. 3. Schematic arrangement of elements of the scanning unit in another plane (side view): ПД – polygonal deflector; M_1 is a flat fixed mirror; M_2 – flat oscillating mirror

Расстояние H' равно

$$H' = \frac{H_2}{\cos(\pi - 2\sigma)},$$

где σ – угол наклона неподвижного зеркала, который является свободным параметром.

Высота положения центра зеркала M_2 определяется как

$$H = \sqrt{H'^2 - H_2^2}.$$

Ширина зеркал L'_1 и L'_2 рассчитывается следующим образом:

$$L'_1 = KD'';$$

$$L'_2 = KD''' ,$$

где $D'' = D'/\cos(\sigma)$ – максимальная проекция лазерного пучка на зеркале M_1 ; $D''' = D''/\cos(\sigma'')$ – максимальная проекция лазерного пучка на зеркале M_2 ; σ'' – предельный угол качания зеркала, равный половине угла, на который необходимо провести кадровую развертку области сканирования.

Зависимость габаритных размеров сканирующего блока от внешних параметров работы

В представленной математической модели габаритные параметры сканирующего блока зависят от таких свободных параметров, как координата положения выходного окна лазера x_L , расстояние от центра неподвижного зеркала до грани ПД H_1 , расстояние между центрами зеркал H_2 , угол подачи излучения на грань ПД α , угол наклона неподвижного зеркала σ . Ограничимся для краткости рассмотрением зависимостей от углов α и σ .

На рисунке 4 приведены графики зависимости координаты положения неподвижного y_1 и качающегося зеркала y_2 относительно угла подачи излучения α . При расчете были использованы следующие параметры: $R = 15$ мм; $H_1 = 30$ мм; $H_2 = 20$ мм (для кривой 2), $H_2 = 50$ мм (для кривой 3), $\theta = \pi/2$.

В случае кривой 1 при увеличении угла подачи излучения α в интервале малых значений ($\alpha < 0,5$ рад) наблюдается рост значения y_1 . При больших значениях α происходит плавное уменьшение y_1 . Форма кривой 2 схожа с формой кривой 1, но здесь отсутствует участок роста значения y_2 . Для кривой 3 наблюдается уменьшение значения y_2 до величины 1 рад, после чего положение качающегося зеркала изменяется

крайне незначительно. Стоит заметить, что в случае 3 наблюдается изменение знака величины y_2 , что говорит об изменении четверти, в которой находится центр качающегося зеркала.

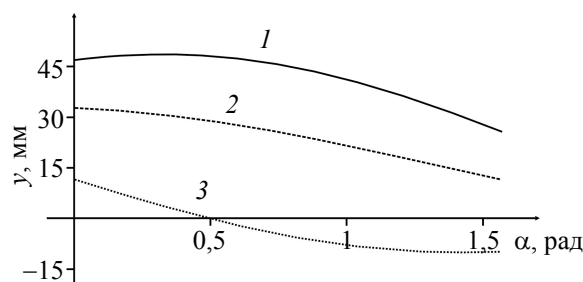


Рис. 4. График зависимости координаты y от угла подачи излучения α : 1 – для y_1 ; 2 – для y_2 при $H_1 > H_2$; 3 – для y_2 при $H_1 < H_2$

Fig. 4. Graph of the dependence of the y coordinate on the radiation angle α : 1 - for y_1 ; 2 - for y_2 at $H_1 > H_2$; 3 - for y_2 at $H_1 < H_2$

На рисунке 5, а приведен график зависимости координаты x_1 от угла подачи излучения α . При расчете использовались следующие параметры: $R = 15$ мм; $C = 0,75$; $m = 6$; $H_1 = 30$ мм; $\theta = \pi/2$. На рисунке 5, б показан график зависимости расстояния H от угла наклона неподвижного зеркала σ . В расчетах принято, что $H_2 = 15$ мм.

Для величины x_1 наблюдается рост значения со сменой знака после границы 1 рад. Смена знака x_1 говорит об изменении четверти расположения центра неподвижного плоского зеркала.

При увеличении угла наклона неподвижного зеркала σ наблюдается рост значения H . При приближении величины угла к значению 0,79 рад (45°) происходит резкое увеличение значения исследуемого параметра, после чего кривая графика идет на спад симметрично интервалу значений, при котором наблюдается рост H .

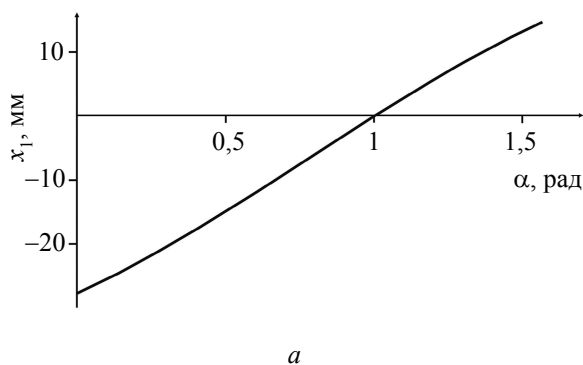


Рис. 5. Графики зависимостей величин: а – координаты x_1 от угла подачи излучения α

Fig. 5. Graphs of dependences of quantities: а - coordinates x_1 on the angle of radiation supply α

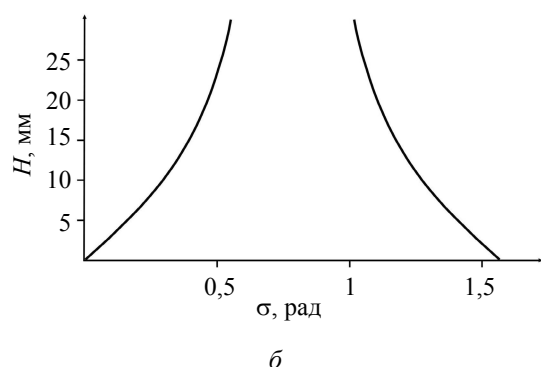


Рис. 5 (окончание): b – расстояние H от угла наклона неподвижного зеркала σ

Fig. 5 (continued): b - distance H from the tilt angle of the fixed mirror σ

Выбор оптимальных значений свободных параметров

Проанализировав показанные выше зависимости, можно сделать вывод, что наименьшего размера сканирующего блока по оси OY можно добиться, используя значения угла подачи излучения $\alpha > 1$ рад (57°). Однако при таких значениях переменной α центр неподвижного зеркала попадает в четверть, где находится выходное окно лазера, что может повлечь за собой трудности при сборке или же сделать создание устройства невозможным. С точки зрения минимизации размера устройства по оси абсцисс стоит остановиться на значениях $\alpha < 1$ рад. При этом такой свободный параметр, как H_2 следует выбирать из соотношения

$$0 \leq H_2 < H_1.$$

Такое ограничение позволит оптимально использовать пространство, занимаемое элементами сканирующего блока. В свою очередь, решение, при котором $H_2 = 0$, позволит разместить два плоских зеркала непосредственно друг над другом, а именно совместить координаты положения центров зеркал по оси абсцисс и ординат. Оптимальные значения угла наклона плоского неподвижного зеркала лежат в диапазоне $\sigma \leq 0,79$ рад. Стоит подробнее остановиться на случае, при котором угол наклона неподвижного зеркала составляет $\sigma = 0,79$ рад (45°). При таком угле наклона величина H формально становится равной бесконечности. Однако в действительности зеркала устанавливаются друг над другом, что позволяет установить качающееся зеркало на любой удобной высоте H .

Экспериментальное доказательство адекватности модели

Изложенная теоретическая модель получила экспериментальное подтверждение при расчете габаритных размеров оптических элементов и их компоновки в макете сканирующего блока, представленного на рисунке 6.

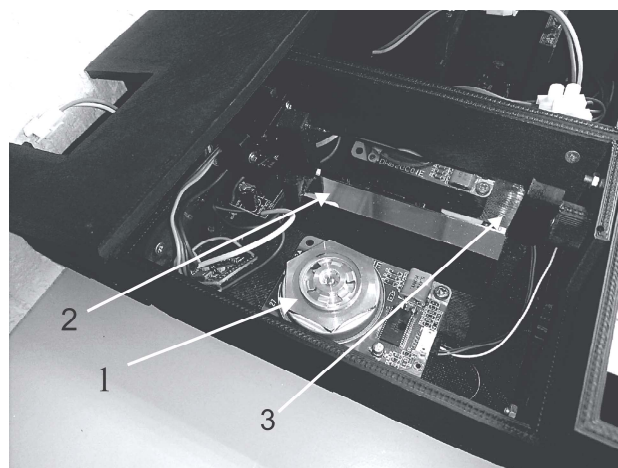


Рис. 6. Фотография макета сканирующего блока созданного по изложенной методике расчета: 1 – ПД; 2 – неподвижное плоское зеркало; 3 – качающееся плоское зеркало

Fig. 6. Photograph of the layout of the scanning unit created according to the above calculation method: 1 - prism deflector; 2 - fixed flat mirror; 3 - oscillating flat mirror

Параметры макета сканирующего блока представлены в таблице.

Параметры макета сканирующего блока Scanning system parameters

Параметр	Значение параметра
Угол сканирования θ	$\pi/3$
Угол кадровой развертки σ	$\pi/4$
Радиус вписанной в ПД окружности R , мм	17,5
Количество граней ПД m	6
Коэффициент полезного использования грани C	0,5
Координата x_L , мм	20
Координата y_L , мм	26
Угол подачи излучения на грань ПД α	$\pi/3$
Коэффициент запаса	3,1
Длина зеркал L_{1r} и L_{2r} , мм	84*
Ширина неподвижного зеркала L'_1 , мм	18
Ширина качающегося зеркала L'_2 , мм	20

Окончание таблицы

Table (continued)

Параметр	Значение параметра
Угол наклона неподвижного зеркала σ	$\pi/4$
Высота положения качающегося зеркала H , мм	20

* Расчетное значение длины неподвижного зеркала составляет $L_{1r} = 23$ мм. При разработке макета было решено использовать зеркала равной длины в целях удешевления создания устройства.

Выводы

Приведена математическая модель, позволяющая провести расчет компоновки сканирующего блока, который включает в себя призматический дефлектор, неподвижное плоское зеркало и качающееся плоское зеркало. При проектировании такого рода систем габаритный размер получаемого устройства зависит от многих свободных параметров, но угол подачи излучения на грань ПД α и угол наклона неподвижного зеркала σ представляют наибольший интерес с точки зрения минимизации и оптимизации габаритных размеров сканирующих элементов и сканирующего блока в целом.

Показано, что эффективно минимизировать габаритный размер сканирующего блока можно лишь по одной оси. Так, для уменьшения размера устройства по оси OY значения угла подачи излучения следует задавать из условия $\alpha > 1$ рад. В свою очередь, наименьшего размера по оси абсцисс можно достичь при $\alpha < 1$ рад при условии, что величина угла подачи превышает половину требуемого угла развертки θ .

Оптимальное взаимное расположение двух зеркал (качающегося и неподвижного) достигается в случае, когда $H_2 = 0$ и $\sigma = 0,79$ рад. Такое решение позволит совместить центры зеркал по оси абсцисс и ординат и установить качающееся зеркало на любой удобной высоте, что даст возможность эффективно использовать пространство, занимаемое элементами сканирующего блока.

Представленные результаты были экспериментально подтверждены при использовании описанной математической модели в процессе создания макета сканирующего блока.

Полученные зависимости можно использовать при разработке автоматизированных систем проектирования лазерных сканирующих устройств.

Библиографические ссылки

1. Низаметдинов Н. Ф., Моисеев П. А., Воробьев И. Б. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин // 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 лазерного сканирование на базе БПЛА для изучения объектов археологии в Европейской части России // Поволжская Археология. 2022. № 1 (39). С. 232–246. DOI: 10.24852/ra2022.1.39.232.246.
3. Калугин А. И., Зарипов М. Р., Антонов Е. А. Лазерная локационная система обнаружения и распознавания малоразмерных объектов // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 1. С. 9–14. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-9-14.
4. Лукьянова М. С., Солодунов А. А. Возможности применения лазерного сканирования // Студенческие научные работы землеустроительного факультета : сборник статей по материалам международной студенческой научно-практической конференции, Краснодар, 19 февраля 2020 г. Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2020. С. 118–123.
5. Кириллова А. И., Сапай А. А., Пантюшина Л. Н. О возможностях создания информационных моделей исторических зданий на основе технологии лазерного сканирования // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 87–90.
6. Артамонов С. И., Грязнов С. И., Купренюк В. И. Выбор сканера для лазерной локационной системы // Оптический журнал. 2016. Т. 83, № 9. С. 51–59.
7. Marshall G.F., Stutz G.E. Handbook of optical and laser scanning. Taylor and Francis Group, 2014, 789 p.
8. Romer G.R.B.E., Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Physics procedia, 2014, no. 56, pp. 29-39. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.092.
9. Gerald F. Marshall, Glenn E. Stutz. Handbook of Optical and Laser Scanning, Second Edition. New York, Marcel Dekker publishing, 2004, 291 p.
10. Duma V.-F. Analysis of polygonal mirror scanning heads: from industrial to high-end applications in swept sources for OCT. Proc. of SPIE - Design and Quality for Biomedical Technologies X, 2017, vol. 10056, pp. 100560 P-1 100560P-11. DOI: 10.1117/12.2251023.
11. Duma V.-F., Duma M.-A. Optomechanical analysis and design of polygon mirror-based laser scanners. Appl. Sci, 2022, vol. 12, pp. 5592. DOI: 10.3390/app12115592.
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. Duma V.-F. Laser scanners with oscillatory elements: design and optimization of 1D and 2D scanning functions. Appl. Mathematical modeling, 2019, vol. 67, pp. 456-476. DO: 10.1016/j.apm.2018.11.001.

14. Sun C., Liu Y., Li B., Su W. Modeling and optimization of a novel ScAlN-Based MEMS scanning mirror with large static and dynamic two-axis tilting angles. *Sensors*, 2021, vol. 21, pp. 5513. DOI: 10.3390/s21165513.

15. Liu C.-S., Tsai C.-H. Design and characterization of innovative optical prism for four-degree-of-freedom fast steering mirror active laser compensation system. *Rev. Sci. Instrum.*, 2022, vol. 93, pp. 045002. DOI: 10.1063/5.0080069.

16. Выскуб В. Г. Возможности и ограничения составных сканаторов // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 5. С. 74–82.

17. Выскуб В. Г. Управление оптическими пучками с применением взаимно дополняющих сканаторов // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2020. № 2 (30). С. 125–138. DOI: 10.35264/1996-2274-2020-2-125-138.

18. Эминов Р. А., Гусейнли Э. И. Оптимизация лазерного сканирования для определения маршрута прокладки нефтегазовых трубопроводов // Проблемы сбора, подготовки и транспортировки нефти и нефтепродуктов. 2019. № 2 (118). С. 91–96.

19. Ганиева С. А., Вердиев С. Б. Вопросы оптимизации функционирования лазерного сканера в режиме измерения деформаций // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: строительство и архитектура. 2019. Т. 19, № 2. С. 18–21. DOI: 10.14529/build190203.

20. Барышников Н. В., Степанов Р. О., Лебедев В. А. Анализ особенностей расчёта характеристик фонового излучения при решении задач лазерной локации в инфракрасном диапазоне спектра // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. 2022. № 1 (138). С. 4-19. DOI: 0.18698/0236-3933-2022-1-4-19.

21. Агачев А. Р., Непогодин И. А. Имитационная математическая модель оценки базовых характеристик лазерно-локационных устройств воздушных носителей // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Казань, 2018. Т. 3. С. 18–24.

22. Старовойтов Е. И., Савчук Д. В. Методы математического моделирования в проектировании бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов // Радиостроение. 2021. № 3. С. 13–35. DOI: 10.36027/rdeng.0321.0000195.

23. Гусаров И. Е., Владимиров В. Д., Калугин А. И. Расчет параметров призменного дефлектора лазерного сканера // Приборостроение-2021 : материалы 14-й Международной научно-технической конференции. Минск, 2021. С. 399-401.

denij. Lesnoj zhurnal, 2021, no. 4, pp. 9-22 (in Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22.

2. Novikov V.V. [UAV lidar investigation archeology sites in European part of Russia]. *Povolzhskaja Arheologija*, 2022, no. 1, pp. 232-246 (in Russ.). 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*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 9-14 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-9-14.

4. Lukyanova M.S., Solodunov A.A. *Vozmozhnosti primeneniya lazernogo skanirovaniya* [Applications of laser scanning]. *Studencheskie nauchnye raboty zemleustroitel'nogo fakul'teta: Sbornik statej po materialam Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Proc. Student works of land management faculty: materials of the international student scientific and practical conference]. Krasnodar, 2020, pp. 118-123 (in Russ.)

5. Kirillova A.I., Sapaj A.A., Pantyushina L.N. [On the possibilities of creating information models of historical buildings on the basis of laser scanning technology]. *Polzunovskij al'manah*, 2022, no. 1, pp. 87-90 (in Russ.).

6. 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*, 2016, vol. 83, no 9, pp. 51-58 (in Russ.).

7. Marshall G.F., Stutz G.E. *Handbook of optical and laser scanning*. Taylor and Francis Group, 2014, 789 p.

8. Romer G.R.B.E., Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. *Physics procedia*, 2014, no. 56, pp. 29–39. DOI 10.1016/j.phpro.2014.08.092

9. Gerald F. Marshall, Glenn E. Stutz. *Handbook of Optical and Laser Scanning*, Second Edition. New York, Marcel Dekker Publishing, 2004, 291 p.

10. Duma V.-F. Analysis of polygonal mirror scanning heads: from industrial to high-end applications in swept sources for OCT. *Proc. of SPIE - Design and Quality for Biomedical Technologies X*, 2017, vol. 10056, pp. 100560 P-1 100560P-11. DOI: 10.1117/12.2251023.

11. Duma V.-F., Duma M.-A. Optomechanical analysis and design of polygon mirror-based laser scanners. *Appl. Sci*, 2022, vol. 12, pp. 5592. DOI: 10.3390/app12115592.

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. Duma V.-F. Laser scanners with oscillatory elements: design and optimization of 1D and 2D scanning functions. *Appl. Mathematical modeling*, 2019, vol. 67, pp. 456-476. DO: 10.1016/j.apm.2018.11.001.

14. Sun C., Liu Y., Li B., Su W. Modeling and optimization of a novel ScAlN-Based MEMS scanning mirror with large static and dynamic two-axis tilting angles. *Sensors*, 2021, vol. 21, pp. 5513. DOI: 10.3390/s21165513.

15. Liu C.-S., Tsai C.-H. Design and characterization of innovative optical prism for four-degree-of-freedom

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]. *Izvestija vysshih uchebnyh zave-*

fast steering mirror active laser compensation system. *Rev. Sci. Instrum.*, 2022, vol. 93, pp. 045002. DOI: 10.1063/5.0080069.

16. Vyskub V.G. [Possibilities and limitations of combined scanners]. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 5, pp. 74-82 (in Russ.).

17. Vyskub V.G. [Controlling optical beams using mutually complementary scanners]. *Innovatika i jeksperimentizatsiya: nauchnye trudy*, 2020, no. 2 (30), pp. 125-138 (in Russ.). DOI: 10.35264/1996-2274-2020-2-125-138.

18. Eminov R.A., Huseynli E.I. [Laser scanning optimization to determine the route of laying oil and gas pipelines]. *Problemy sbora, podgotovki i transportirovki nefii i nefteproduktov*, 2019, no. 2 (118), pp. 91-96 (in Russ.).

19. Ganiyeva S.A., Verdiyev S.B. [Issues on optimization of the laser scanner functioning in the deformation measurements regime]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: stroitel'stvo i arhitektura*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 18-21 (in Russ.). DOI: 10.14529/build190203.

20. Baryshnikov N.V., Stepanov R.O., Lebedev V.A. [Analysis of the features of calculating the background radiation characteristics when solving problems of laser location in the infrared range of the spectrum]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. Je. Baumana*, 2022, no. 1 (138), pp. 4-19 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2022-1-4-19.

21. Agachev A.R., Nepogodin I.A. *Imitacionnaya matematicheskaya model' ocenki bazovykh harakteristik lazerno-lokacionnykh ustrojstv vozdukhnykh nositelej* [Simulation mathematical model for estimating the basic characteristics of laser-location devices on air vehicles]. *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossijskoj aviakosmicheskoy otrasli: Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Materialy dokladov*. [New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry: Proc. of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Materials of reports]. Kazan, 2018, vol. 3, pp. 18-24 (in Russ.).

22. Starocoitov E.I., Savchuk D.V. [Mathematical modeling methods in designing onboard laser-ranging systems of spacecraft]. *Radiostroenie*, 2021, no. 3, pp. 13-35 (in Russ.). DOI: 10.36027/rdeng.0321.0000195.

23. Gusarov I.E., Vladimirov V.D., Kalugin A.I. *Raschyot parametrov prizmennogo deflektora lazernogo skanera* [Calculation of the parameters of the prismatic deflector of a laser scanner]. *Priborostroenie-2021: Materialy 14-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Proc. of the 14th International Scientific and Technical Conference, Instrument Engineering 2021]. Minsk, 2021, pp. 399-401 (in Russ.).

Method for Calculating the Scanning Unit of a Laser Scanner and Optimizing Its Overall Dimensions

I.E. Gusarov, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

A.I. Kalugin, PhD (Physics and Mathematics), Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

E.A. Antonov, PhD (Physics and Mathematics), Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

V.Yu. Trubitsin, DSc (Physics and Mathematics), Head of Laboratory "MLL", Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

A prism deflector, which is a multifaceted prism with reflective edges, is the most common scanning element that allows fast filling of a wide scanning area with laser radiation pulses along one coordinate. To carry out the movement of laser radiation along the second coordinate of the region under study a second scanning element, for example, a flat oscillating mirror, should be used. The overall dimensions of the scanning elements and the scanning unit as a whole depend on the free parameters that are set at the system development stage.

The paper proposes a mathematical model designed for automated calculation of a scanning unit consisting of a prism deflector, a fixed flat mirror, an oscillating flat mirror, and a laser exit window. The described model makes it possible to calculate the overall parameters of system optical elements and the layout of the block based on the required characteristics of the scanned area and free parameters, which include the angle of radiation supply to the face of the prism deflector, the tilt angle of the fixed mirror, and one of the coordinates of the laser output window position relatively to the center of the prism deflector. In this case, the first two mentioned parameters are of the greatest interest from the point of view of minimizing and optimizing the overall dimensions of the scanning elements and the scanning unit as a whole.

Based on the above model, an analysis of the dependence of the overall dimensions of the scanning elements and the scanning unit as a whole was carried out. The paper describes the layout features of the scanning unit. Recommendations for choosing the value of such free parameters as the angle of radiation supply to the face of the prism deflector and the angle of inclination of a flat fixed mirror are given. The obtained results can be used in the development of automated systems for the design of laser scanning devices.

Keywords: scanner, scanning system, parameters of the scanning system, optimization of parameters, prism deflector.

Получено 09.11.2022

Образец цитирования

Метод расчета сканирующего блока лазерного сканера и оптимизация его габаритных размеров / И. Е. Гусаров, А. И. Калугин, Е. А. Антонов, В. Ю. Трубицын // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 4. С. 37–46. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-37-46.

For Citation

Gusarov I.E., Kalugin A.I., Antonov E.A., Trubitsin V.Yu. [Method for Calculating the Scanning Unit of a Laser Scanner and Optimizing Its Overall Dimensions]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 37-46 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-37-46.