



УДК 520.6; 535.31

## ЛИДАРНЫЙ УЗЕЛ КОМБИНИРОВАННОГО СКАНИРОВАНИЯ

В.В. Елизаров<sup>a</sup>, А.С. Гришканич<sup>a</sup>, А.П. Жевлаков<sup>a</sup>, С.В. Кашеев<sup>a</sup>, А.А. Рыбиков<sup>a</sup>, И.С. Сидоров<sup>b</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>b</sup> Университет Восточной Финляндии, Куопио, 70211, Финляндия

Автор для переписки: kystos@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 04.10.16, принята к печати 30.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1004-1009

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Елизаров В.В., Гришканич А.С., Жевлаков А.П., Кашеев С.В., Рыбиков А.А., Сидоров И.С. Лидарный узел комбинированного сканирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1004–1009. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1004-1009

### Аннотация

**Предмет статьи.** Представлены результаты разработки комбинированного узла сканирования лидара для поиска утечек углеводородов, позволяющего выполнять высокоскоростное сканирование исследуемого пространства в широком и узком угловых полях. **Метод.** Сканирование в широком угловом поле производится по однострочной траектории с помощью подвижного алюминиевого зеркала с частотой 20 Гц и амплитудой качания 20°. Узкополосное сканирование выполняется по спиральной траектории с помощью дефлектора. Отклонение луча осуществляется за счет вращения оптических клиньев, входящих в состав дефлектора, на угол  $\pm 5^\circ$ . Функцию управления сканирующим узлом выполняет специализированный программный продукт, написанный на языке программирования C#. **Основные результаты.** Узел позволяет производить сканирование исследуемой территории на дистанции 50–100 м с пространственным разрешением на уровне 3 см. Точность позиционирования лазерного луча в пространстве составляет 15'. Разработанный сканирующий узел позволяет производить обзор всей исследуемой области за время не более 1 мс при частоте вращения каждого из клиньев 50–200 Гц. На программном уровне решена задача однозначного определения географических координат луча в пространстве по углам поворота зеркала и оптических клиньев. Координаты носителя лидарной системы определяются с помощью GPS-приемника. **Практическая значимость.** Результаты разработки открывают возможность повышения пространственного разрешения сканирующих систем широкого спектра лидаров и обеспечить высокую точность позиционирования лазерного луча в пространстве.

### Ключевые слова

дистанционное зондирование, лидар, сканирующая система, спиральное сканирование, пространственное разрешение

## LIDAR COMBINED SCANNING UNIT

V.V. Elizarov<sup>a</sup>, A.S. Grishkanich<sup>a</sup>, S.V. Kascheev<sup>a</sup>, A.P. Zhevnikov<sup>a</sup>, A.A. Rybikov<sup>a</sup>, I.S. Sidorov<sup>b</sup><sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>b</sup> University of Eastern Finland, Kuopio, 70211, Finland

Corresponding author: kystos@mail.ru

### Article info

Received 04.10.16, accepted 30.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1004-1009

Article in Russian

**For citation:** Elizarov V.V., Grishkanich A.S., Kascheev S.V., Zhevnikov A.P., Rybikov A.A., Sidorov I.S. Lidar combined scanning unit. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1004–1009. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1004-1009

### Abstract

**Subject of Research.** The results of lidar combined scanning unit development for locating leaks of hydrocarbons are presented. The unit enables to perform high-speed scanning of the investigated space in wide and narrow angle fields. **Method.** Scanning in a wide angular field is produced by one-line scanning path by means of the movable aluminum mirror with a frequency of 20 Hz and amplitude of 20 degrees of swing. Narrowband scanning is performed along a spiral path by the deflector. The deflection of the beam is done by rotation of the optical wedges forming part of the deflector at an angle of  $\pm 5^\circ$ . The control function of the scanning node is performed by a specialized software product written in C# programming language. **Main Results.** This scanning unit allows scanning the investigated area at a distance of 50–100 m with spatial

resolution at the level of 3 cm. The positioning accuracy of the laser beam in space is 15'. The developed scanning unit gives the possibility to browse the entire investigated area for the time not more than 1 ms at a rotation frequency of each wedge from 50 to 200 Hz. The problem of unambiguous definition of the beam geographical coordinates in space is solved at the software level according to the rotation angles of the mirrors and optical wedges. Lidar system coordinates are determined by means of GPS. **Practical Relevance.** Development results open the possibility for increasing the spatial resolution of scanning systems of a wide range of lidars and can provide high positioning accuracy of the laser beam in space.

#### Keywords

remote sensing, lidar, scanning system, spiral scanning, spatial resolution

#### Введение

Лазерное зондирование может служить высокоэффективным методом дистанционного оперативного экологического мониторинга на суше и над поверхностью водных объектов. Искомыми веществами могут быть различные вещества-индикаторы утечек углеводородов из трубопроводов и перерабатывающих предприятий, токсичные агенты, использующиеся для химических производств, дым от пожаров и т.д. Для осуществления дистанционного зондирования используются специализированные лидарные системы.

Основная цель применения большинства современных лидарных систем, созданных для экологического мониторинга – качественная и количественная оценка содержания искомого вещества в атмосфере или в приземном слое атмосферы. При проектировании таких систем стараются добиться максимальной чувствительности, селективности, а также обеспечить сканирование исследуемого пространства с высоким пространственным разрешением. В ряде работ [1–4] авторами было показана возможность достижения чувствительности лидарной системы на уровне единиц parts per million (частей на миллион) с возможностью одновременного детектирования и селекции широкого ряда веществ индикаторов. В данной работе показан пример реализации комбинированного узла сканирования лидарной системы, позволяющего выполнять высокоскоростное сканирование исследуемого пространства в широком и узком угловых полях, кроме того, обеспечивающего высокую точность позиционирования лазерного луча в пространстве.

Как показала практика, при создании сканирующего узла приходится столкнуться с рядом трудностей. Во-первых, необходимо определять угловые координаты положения лазерного луча с высоким пространственным разрешением в любой момент времени. Во-вторых, необходимо автоматизировать управление сканирующим узлом для обеспечения непрерывного пространственного сканирования. Кроме того, применение некоторых траекторий сканирования приводит к флуктуации пространственного разрешения, что может привести к пропускам объекта зондирования или иным ошибкам. Преодолеть данные трудности удалось за счет выбора оптимальной траектории сканирования и использования специализированных программных алгоритмов управления и аппаратных средств.

#### Технические решения при создании сканирующего узла

На сегодняшний день в большинстве лидарных систем используются сканирующие головки, позволяющие выполнять сканирование лишь в широких угловых полях с углом обзора 15–40° [5–7] по односторонней траектории. Преимуществом использованной комбинированной сканирующей системы является существенно более высокое (на 2–5 порядков) пространственное разрешение, достигающееся за счет последовательного сканирования исследуемой области в узком угле. По результатам дистанционного зондирования может быть построен трехмерный профиль распределения концентрации искомого вещества с плотностью точек по осям 3 см. На рис. 1 представлена функциональная схема лидара с комбинированной системой сканирования.

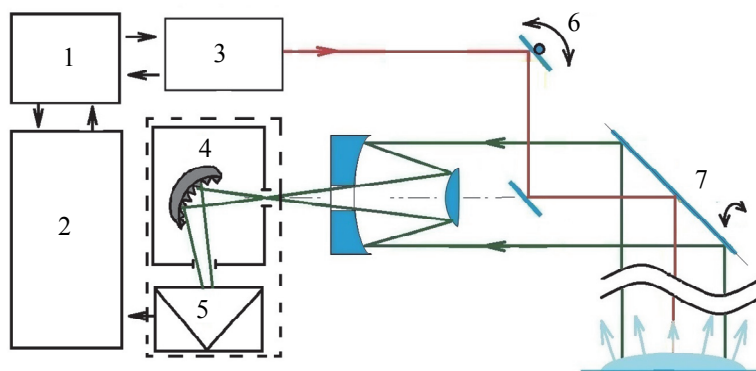


Рис. 1. Функциональная схема лидара с комбинированной системой сканирования: 1 – блок контроля параметров выходного лазерного излучения; 2 – модуль обработки сбора и хранения информации; 3 – лазерный источник; 4 – полихроматор; 5 – детекторный блок; 6 – дефлектор; 7 – сканирующее зеркало

### Сканирование в широком угловом поле

В разработанном узле функцию наведения луча выполняет подвижное сканирующее зеркало. Сканирующее зеркало крепится на валу шагового двигателя FL86STH156-6204A, осуществляющего его поворот в процессе сканирования на угол  $\pm 10^\circ$ . Шаговым двигателем управляет контроллер шаговых двигателей OSM-88R. Основными исходными параметрами при выборе двигателя являлись необходимый крутящий момент и величина полного шага. При расчете значения требуемого крутящего момента учтены масса зеркала и его сложная геометрия. Расчеты показали, что для поворота зеркала на рабочей частоте достаточен крутящий момент 95 кгс·см. Плавность движения зеркала достигается при величине полного шага, равной  $1,8^\circ$ , с коэффициентом дробления шага  $1/4$ . Положение вала двигателя контролируется абсолютным датчиком начального положения ЛИР-МА208 с точностью  $15'$ , использующим последовательный интерфейс SSI для передачи данных в виде кода Грея о положении вала. Данный интерфейс обеспечивает скорость передачи данных до 20 Мбит/с.

### Сканирование в узком угловом поле

**Выбор схемы сканирования.** На сегодняшний день наиболее распространены следующие траектории сканирования: спиральная, квазиспиральная, розеточная и траектории сканирования [8–10]. Однако чаще всего применяется построчное сканирование, в силу равномерности разрешающей способности по полю сканирования и достаточно высокого быстродействия [11].

Стоит отметить, что данный метод имеет существенный недостаток – при изменении направления движения зондирующего луча могут наблюдаться существенные временные задержки, и, как следствие, возникает дискретность или пропуски [10, 12]. Данного недостатка лишено сканирование по спиральной траектории. Также существенными преимуществами спиральной траектории сканирования является самое высокое быстродействие среди обозначенных методов и равномерность скорости сканирования при сравнительно простой схеме сканирующего узла.

Исходя из анализа существующих траекторий сканирования пространства лазерным лучом, авторами выбрана спиральная траектория. Неравномерность разрешающей способности по полю сканирования устранена использованием специализированных алгоритмов коррекции скорости вращения пары оптических клиньев по мере прохождения траектории, обеспечивающих при известной дальности зондирования и расходимости лазерного излучения отсутствие «слепых» зон по всей области обзора.

**Оптический дефлектор.** Для узкопольного сканирования разработан дефлектор, позволяющий производить последовательное подсканирование исследуемой области по спиральной траектории. Рассматривая схемы построения оптического дефлектора, можно выделить несколько основных вариантов его реализации:

- сканирующий дефлектор на основе вращающихся оптических клиньев [12];
- сканирующий дефлектор на основе оптических деталей с изменяемыми управления оптическими свойствами [12];
- сканирующий дефлектор на основе вращающихся объективов [12];
- сканирующий дефлектор на основе управляемых матриц кремниевых сканирующих зеркал [13];
- сканирующий дефлектор на основе электромагнитно-управляемых зеркал [14].

Проанализировав существующие схемы построения, авторы выбрали вариант дефлектора, в котором сканирование осуществляется за счет вращения оптических клиньев. Одно из существенных преимуществ такой конструкции сканирующего узла по сравнению с другими – это наличие «оптической редукиции» между углом поворота клина и углом отклонения оптической оси прибора [13, 15]. Также такая конструкция обеспечивает максимальную точность позиционирования, так как ошибка в угле отклонения оптической оси в  $1'$  соответствует ошибке в угле поворота клиньев  $9'$ . Не менее важные преимущества – простота управления и контроля дефлектора. Основным недостатком данной схемы состоит в том, что значительные хроматические aberrации нивелируются использованием источника лазерного излучения на известной длине волны и механизмов цифровой обработки рассеянного излучения. Стоит отметить, что разработанный нами дефлектор позволяет производить обзор всей исследуемой области за время не более 1 мс при частоте вращения каждого из клиньев 50–200 Гц. Вращение осуществляется посредством шаговых двигателей FL28STH32-0956B с минимальной величиной шага  $9,5'$ . Положение клиньев аналогично системе широкополосного сканирования фиксируется датчиком углового поворота ЛИР-МА208.

Как удалось установить, ни одна из других рассмотренных схем не позволяет одновременно обеспечить должный уровень быстродействия, точности и простоты управления и контроля.

### Алгоритмы вычисления координат лазерного луча в пространстве

Спиральная траектория сканирования формируется при вращении двух оптических клиньев в одном направлении с разными скоростями. Как известно, угол отклонения луча определяется следующим выражением [16]:

$$\begin{cases} \delta_1 = \alpha_1(n-1) \\ \delta_2 = \alpha_2(n-1) \end{cases}$$

где  $n$  – коэффициент преломления;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы при вершинах оптических клиньев.

Проекционные координаты отклоненного луча по осям  $X$  и  $Y$  могут быть вычислены по следующей формуле:

$$\begin{cases} \delta_x = \delta_1 \cos \theta_1 \alpha_1 + \delta_2 \cos \theta_2 \alpha_2 \\ \delta_y = \delta_1 \sin \theta_1 \alpha_1 + \delta_2 \sin \theta_2 \alpha_2 \end{cases}$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы поворота оптических клиньев.

Если в дефлекторе используются два одинаковых оптических клина, координаты зондирующего луча при дальности зондирования  $L$  могут быть получены, используя следующее выражение [17]:

$$\begin{cases} X = L\delta[\cos(2\pi f_1 + \theta_{10}) + \cos(\pm 2\pi f_1 + \theta_{20})] \\ Y = L\delta[\sin(2\pi f_1 + \theta_{10}) + \sin(\pm 2\pi f_1 + \theta_{20})] \end{cases}$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – частота вращения каждого из клиньев;  $\theta_{10}$  и  $\theta_{20}$  – начальный угол поворота клина.

Таким образом, полученные координаты  $X$  и  $Y$  характеризуют отклонение лазерного луча по координатным осям относительно носителя лидарной системы. Географические координаты носителя лидарной системы определяются GPS-треккером, установленным на борту. Для корректного определения географических координат смещенного лазерного луча необходимо учесть, что Земля представляет собой эллипсоид. Основываясь на этом, для нахождения истинных географических координат трассы лазерного луча в пространстве применен алгоритм Винсенти, который представляет собой итерационный метод определения географических координат по расстоянию между двумя точками и вектору направления [18].

#### Алгоритм коррекции разрешающей способности по полю сканирования

Как было отмечено ранее, при сканировании по спиральной траектории возникают флуктуации пространственного разрешения. Так, в процессе сканирования наблюдаются пропуски на внешних витках спирали или множественное переналожение мгновенного поля зрения на внутренних витках, что существенно усложняет получение объективных данных в процессе дистанционного зондирования.

Решением данной проблемы явилось использование алгоритмов коррекции скорости вращения пары оптических клиньев по мере прохождения траектории. Как известно пространственное разрешение зависит от коэффициента  $k$ , который определяется отношением частот вращения оптических клиньев [15, 17]. Для нахождения оптимального значения данного соотношения на любом витке спирали сканирования был разработан специализированный алгоритм. Исходными данными для него являются расходимость лазерного излучения и дистанция зондирования. Первоначально вычисляется элемент разложения, равный мгновенному полю зрения на заданной дальности. После этого происходит заполнение каждого витка спирали сканирования так, чтобы элементы разложения располагались на траектории без наложения друг на друга. Одновременно вычисляется коэффициент  $k$  для каждого витка спирали и определяются необходимые скорости вращения оптических клиньев. Эта информация передается на контроллер шаговых двигателей в режиме реального времени.

Используя язык программирования C#, создано программное обеспечение, которое позволило в лабораторных условиях оценить эффективность алгоритма. Как видно из рис. 2, все поле сканирования равномерно заполнено элементами разложения, а значения коэффициента  $k$  находятся в диапазоне 0,8–0,95 для дистанции 150 м при расходимости лазерного излучения 1,5 мрад.

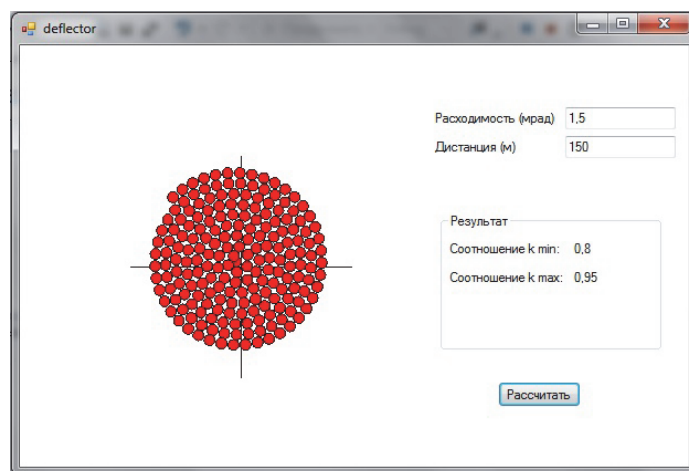


Рис. 2. Интерфейс программы коррекции разрешающей способности

### Заключение

Разработанная сканирующая головка обеспечивает обзор исследуемого пространства в процессе дистанционного экологического мониторинга с высокой плотностью угловых координат (рис. 3). Предложен алгоритм нахождения координат лазерного луча в любой момент времени при сканировании исследуемого пространства по спиральной траектории. Показана возможность обеспечения равномерной разрешающей способности во всей области сканирования. Разработанный программно-аппаратный сканирующий узел может быть использован в составе лидарной системы для последующего формирования трехмерного профиля распределения концентрации исследуемого компонента с высокой точностью.

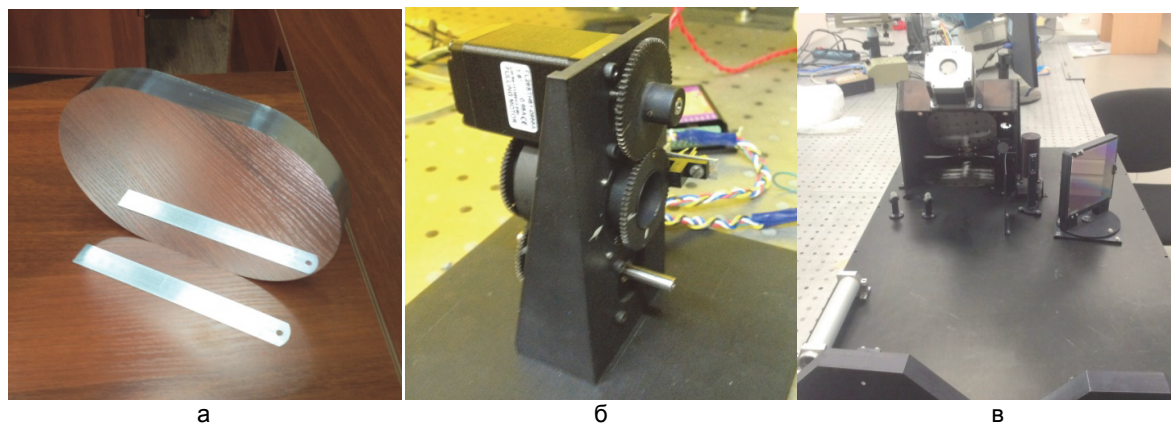


Рис. 3. Сканирующая головка: сканирующее зеркало (а); дефлектор (б); сканирующая головка в сборе (в)

### Литература

1. Grishkanich A.S., Polyakov V., Sidorov I., Kascheev S., Elizarov V., Zhevnikov A., Mak A. Search a methane hydrate in the Arctic with photonics methods // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9899. Art. 98992U.
2. Grishkanich A.S., Zhevnikov A.P., Sidorov I., Elizarov V.V., Mak A.A., Kascheev S.V. Lidar for monitoring methane emission in Siberian permafrost // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9729. Art. 97290M. doi: 10.1117/12.2214742
3. Zhevnikov A.P., Bepalov V.G., Elizarov V.V., Grishkanich A.S., Kascheev S.V., Makarov E.A., Il'inskiy A.A. Hydrocarbon halo-laser spectroscopy for oil exploration needs // *Proceedings of SPIE*. 2014. V. 9141. Art. 914125. doi: 10.1117/12.2052165
4. Grishkanich A.S., Bepalov V.G., Bogoslovsky S.A., Elizarov V.V., Il'inskiy A.A., Kascheev S.V., Makarov E.A., Zhevnikov A.P. Laser sensor for airborne prospecting method of oil & gas deposits // *Proc. Int. Conf. Laser Optics*. St. Petersburg, Russia, 2014. Art. 6886391. doi: 10.1109/LO.2014.6886391
5. Sheng Y. Quantifying the size of a lidar footprint: a set of generalized equations // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2008. V. 5. N 3. P. 419–422. doi: 10.1109/LGRS.2008.916978
6. Амон Ф., Ригль У., Ригер П., Пфеннигбауэр М. Применение лазерного сканирования с беспилотных летательных систем (БПЛА) для мониторинга, сложных и комплексных геодезических задач // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2015. С. 32–41.
7. Means J.E., Acker S.A., Fitt B.J., Renslow M., Emerson L., Hendrix C.J. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2000. V. 66. N 11. P. 1367–1371.
8. Устинов Н.Д., Матвеев И.Н., Протопопов В.В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. М.: Наука, 1983. 272 с.
9. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. М.: Радио и связь, 1984. 136 с.
10. Слободян С.М. Анализ и оптимизация телевизионного принципа сканирования фазового пространства оптическим фазометром: 1. Поискные траектории // *Известия Томского политехнического университета*. 2004. Т. 307. №. 6. С. 65–72.
11. Малашин М.С. Основы проектирования лазерных локационных систем. М.: Высшая школа, 1983. 207 с.
12. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-

### References

1. Grishkanich A.S., Polyakov V., Sidorov I., Kascheev S., Elizarov V., Zhevnikov A., Mak A. Search a methane hydrate in the Arctic with photonics methods. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9899, art. 98992U.
2. Grishkanich A.S., Zhevnikov A.P., Sidorov I., Elizarov V.V., Mak A.A., Kascheev S.V. Lidar for monitoring methane emission in Siberian permafrost. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9729, art. 97290M. doi: 10.1117/12.2214742
3. Zhevnikov A.P., Bepalov V.G., Elizarov V.V., Grishkanich A.S., Kascheev S.V., Makarov E.A., Il'inskiy A.A. Hydrocarbon halo-laser spectroscopy for oil exploration needs. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9141, art. 914125. doi: 10.1117/12.2052165
4. Grishkanich A.S., Bepalov V.G., Bogoslovsky S.A., Elizarov V.V., Il'inskiy A.A., Kascheev S.V., Makarov E.A., Zhevnikov A.P. Laser sensor for airborne prospecting method of oil & gas deposits. *Proc. Int. Conf. Laser Optics*. St. Petersburg, Russia, 2014, art. 6886391. doi: 10.1109/LO.2014.6886391
5. Sheng Y. Quantifying the size of a lidar footprint: a set of generalized equations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, vol. 5, no. 3, pp. 419–422. doi: 10.1109/LGRS.2008.916978
6. Amon F., Riegl U., Riegl P., Pfenningbauer M. UAV based laser scanning for monitoring applications and challenging, complex surveying tasks. *Interexpo Geo-Sibir'*, 2015, pp. 32–41.
7. Means J.E., Acker S.A., Fitt B.J., Renslow M., Emerson L., Hendrix C.J. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, vol. 66, no. 11, pp. 1367–1371.
8. Ustinov N.D., Matveev I.N., Protopopov V.V. *Methods of Optical Fields Processing in Laser Location*. Moscow, Nauka Publ., 1983, 272 p. (In Russian)
9. Pustynskii I.N., Slobodyan S.M. *Dissektornye Sledyashchie Sistemy* [Dissecting Tracking Systems]. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1984, 136 p.
10. Slobodyan S.M. Analysis and optimization of the television principle of scanning phase space by the optical phasometer: 1. Search scan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 6, pp. 65–72.
11. Malashin M.S. *Bases of Laser Location Systems Designing*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1983, 207 p. (In Russian)
12. Miroshnikov M.M. *Theoretical Basis of Optoelectronic Devices*. 3<sup>rd</sup> ed. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010, 704 p. (In Russian)
13. Borisov M.F., Danilov M.F., Maksimov A.A., Motylev N.G.,

- электронных приборов. 3-е изд. СПб.: Лань, 2010. 704 с.
13. Борисов М.Ф., Данилов М.Ф., Максимов А.А., Мотылев Н.Г., Павлов Н.И., Прилипко А.Я., Телятников С.В., Чилипенко А.Л. Оптико-локационная система с круговой зоной поиска: алгоритм управления исполнительными устройствами и его реализация // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 9. С. 49–55.
  14. Чесноков Д.В. Микромеханический дефлектор световых потоков // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2006. Т. 4. С. 126–133.
  15. Lu Y., Hei M., Fan D. Frame frequency prediction for Risley-prism-based imaging laser radar // *Applied Optics*. 2014. V. 53. N 16. P. 3556–3564. doi: 10.1364/AO.53.003556
  16. Cai Y.Q., Tong X.H., Bu H.Y., Shu R. Study on image deformation of spaceborne three-dimensional LIDAR imaging in non-equilibrium state // *Journal of Astronautics*. 2011. V. 32. P. 407–413. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.2.027
  17. Lu Y., Zhou Y., Hei M., Fan D. Theoretical and experimental determination of steering mechanism for Risley prism systems // *Applied Optics*. 2013. V. 52. N 7. P. 1389–1398. doi: 10.1364/AO.52.001389
  18. Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations // *Survey Review*. 1975. V. 23. N 176. P. 88–93. doi: 10.1179/sre.1975.23.176.88
  - Pavlov N.I., Prilipko A.Y., Telyatnikov S.V., Chilipenko A.L. Optical radar system with a circular search zone: an actuator-control algorithm and how to implement it. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 9, pp. 563–567.
  14. Chesnokov D.V. Micromechanical deflector of light streams. *Interekspo Geo-Sibir'*, 2006, vol. 4, pp. 126–133.
  15. Lu Y., Hei M., Fan D. Frame frequency prediction for Risley-prism-based imaging laser radar. *Applied Optics*, 2014, vol. 53, no. 16, pp. 3556–3564. doi: 10.1364/AO.53.003556
  16. Cai Y.Q., Tong X.H., Bu H.Y., Shu R. Study on image deformation of spaceborne three-dimensional LIDAR imaging in non-equilibrium state. *Journal of Astronautics*, 2011, vol. 32, pp. 407–413. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.2.027
  17. Lu Y., Zhou Y., Hei M., Fan D. Theoretical and experimental determination of steering mechanism for Risley prism systems. *Applied Optics*, 2013, vol. 52, no. 7, pp. 1389–1398. doi: 10.1364/AO.52.001389
  18. Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. *Survey Review*, 1975, vol. 23, no. 176, pp. 88–93. doi: 10.1179/sre.1975.23.176.88

### Авторы

**Елизаров Валентин Владимирович** – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kystos@mail.ru

**Гришканич Александр Сергеевич** – магистр, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, grishkanich@yandex.ru

**Жевлаков Александр Павлович** – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, zhevnikov\_43@mail.ru

**Кашеев Сергей Васильевич** – кандидат технических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, skascheev@mail.ru

**Рыбиков Андрей Александрович** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, reastat070@mail.ru

**Сидоров Игорь Сергеевич** – Ph.D., научный сотрудник, Университет Восточной Финляндии, Куопио, 70211, Финляндия, sidorov.igor.s@gmail.com

### Authors

**Valentin V. Elizarov** – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kystos@mail.ru

**Alexander S. Grishkanich** – master, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, grishkanich@yandex.ru

**Alexander P. Zhevnikov** – PhD, leading engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, zhevnikov\_43@mail.ru

**Sergei V. Kascheev** – PhD, leading engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, skascheev@mail.ru

**Andrei A. Rybikov** – bachelor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, reastat070@mail.ru

**Igor S. Sidorov** – PhD, scientific researcher, University of Eastern Finland, Kuopio, 70211, Finland, sidorov.igor.s@gmail.com