

УДК 528.8.042

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

## Лазерная локационная система обнаружения и распознавания малоразмерных объектов\*

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

*М. Р. Зарипов*, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

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

*При проектировании современных локационных комплексов помимо поиска крупных летательных аппаратов типа самолетов или вертолетов также возникает задача быстрого обнаружения малоразмерных воздушных объектов, что в свою очередь вынуждает разработчиков данных систем применять в их составе лазерные источники для зондирования воздушного пространства. Целью работы является исследование возможности применения источников лазерного излучения для локации малоразмерных объектов, а также требований к лазерным локационным системам и проблем, связанных с переходом от радиоволнового диапазона к оптическому. В работе рассмотрены проблема обнаружения малоразмерных воздушных объектов и связанный с ней вопрос построения лазерных локационных систем кругового обзора. Описаны методы определения расстояний до объектов и измерения их угловых координат, которые применяются в данных системах. Приведен предполагаемый состав разрабатываемой системы и отмечены основные функции ее частей, а также их взаимодействие. Представлены оценка необходимой мощности лазерного излучения и количество применяемых в системе лазерных источников в зависимости от предельной дальности зондирования. Предложен способ решения поставленной проблемы за счет разделения системы на блок определения угловых координат и блок определения дальности.*

**Ключевые слова:** лазерная локационная система, сканирующее устройство, дальность зондирования, лазерный источник, распознавание объектов, обнаружение объектов.

### Введение

В настоящее время существует проблема обнаружения и распознавания малоразмерных воздушных объектов (птицы, квадрокоптеры и т. д.). Локационные комплексы, применяемые для зондирования крупных воздушных целей типа авиационных летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, крылатых и баллистических ракет и т. д.), как правило, действуют в радиоволновом диапазоне электромагнитного спектра. Подобные системы не обеспечивают обнаружения малоразмерных объектов, так как, во-первых, эффективная площадь рассеяния (ЭПР) очень мала, а во-вторых, длина волны радиоизлучения передатчиков данных комплексов больше или соизмерима с величинами зондируемых объектов. Длина волны оптического диапазона излучения много меньше размеров рассматриваемых объектов. Поэтому при рассмотрении взаимодействия оптического излучения с объектом необходимо учитывать не рассеяние, а отражение поверхностью объекта. Следовательно, вместо ЭПР требуется использовать понятие эффективной площади отражения (ЭПО), которое в свою очередь

учитывает угловое распределение отражательной способности [1]. Под ЭПО следует понимать площадь плоского эталонного объекта, расположенного нормально к направлению падающего излучения, мощность излучения отраженного от которого в обратном направлении равна мощности отраженного от зондируемого объекта излучения.

Применение лазеров для создания локационных систем может дать много преимуществ по сравнению с радиолокационными методами, об этом свидетельствует рост интереса в последние годы к исследованию способов расширения возможностей лидарных систем и установок лазерной дальнометрии [2–6], а также к моделированию угловых функций отражения для различных материалов и типов поверхностей [7–11]. Однако существует ряд препятствий, которые ограничивают применение лазерных локационных систем (ЛЛС).

### Теория

Основная задача ЛЛС заключается в измерении угловых координат и расстояния до объекта. Принципиально ЛЛС состоит из четырех

© Калугин А. И., Зарипов М. Р., Антонов Е. А., 2020

\* Работа выполнена в рамках темы НИР УдмФИЦ УрО РАН «Искусственный интеллект в разработке, обучении и сопровождении экспертных систем представления и использования знаний в естественно-научных, технических и социогуманитарных направлениях» АААА-А19-119092690104-4.

основных компонент [12–15]: излучатель, приемник, сканирующее устройство и вычислительный блок. Излучатель, в состав которого входят лазерный источник и передающая оптическая система, последовательно заполняет лазерными пятнами заданное пространство с помощью сканирующего устройства. Излучение, достигнув цели, отражается от нее и поступает в приемник, включающий приемную оптическую систему и фотоприемное устройство (ФПУ). По направлению лазерного пучка определяют угловые координаты объекта.

Для определения расстояния до объектов выделяют две группы методов: фазовые и времяпролетные методы. Первые основаны на амплитудной модуляции мощности лазерного излучения по синусоидальному закону. При этом измерение фазового сдвига оптического сигнала, отразившегося от объекта и поступившего на ФПУ, относительно сигнала, вышедшего из лазерного источника, позволит вычислить расстояние до объекта. Фазовые методы позволяют измерять расстояния с высокой точностью (0,1–1 мм). Однако максимальные дальности таких методов, как правило, ограничены длиной модулирующей волны либо требуют изменения частоты модуляции при измерении расстояний и решения системы уравнений с разными частотами. Кроме того, такие измерения требуют значительного времени. Вследствие этого предельные расстояния, измеряемые фазовыми лазерными дальномерами, обычно составляют 300–400 м, а время сканирования всей полусферы может достигать от десятков минут до часа.

В случае времяпролетных методов измеряется время прохождения лазерного импульса до объекта и обратно, по которому рассчитывается дальность объекта  $l$ :

$$l = \frac{ct}{2}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света,  $t$  – время пролета лазерного импульса до объекта и обратно.

Достоинством данных методов является предельная простота реализации. Но точность измерения расстояния ограничена длительностью обратного отраженного на ФПУ импульса, так как погрешность измерения времени составляет не менее половины длительности отраженного сигнала [16]. Существующие методы увеличения точности требуют многократных измерений, что значительно увеличивает время определения расстояния. Другим серьезным недостатком времяпролетных методов является невозможность одновременного измерения рас-

стояний до двух или более объектов в одном пространственном секторе. При поступлении отраженных сигналов на один приемник будет невозможно распознать, какому объекту соответствует определенный сигнал, то есть возникает проблема дифференциации сигналов. Поэтому времяпролетные системы строятся так, чтобы отдельные зондируемые сектора пространства сканировались лазерами с разными длинами волн или по-разному модулированными сигналами. На сегодняшний день существуют ЛЛС, обеспечивающие деление полусферы зондируемого пространства на 8–16 угловых секторов равного размера. При этом число секторов ( $a$  вместе с ним и число излучателей) возрастает с увеличением требуемой дальности измерения. Это обусловлено потерями мощности излучения и увеличением требуемой частоты импульсов лазера.

Мощность оптического сигнала, которая возвращается от объекта на ФПУ, определяется следующей формулой:

$$P = \gamma \cdot T_{\text{атм}}^2 \cdot T_{\text{опт}} \cdot \varepsilon \cdot P_l, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – геометрический фактор,  $T_{\text{атм}}$  – коэффициент пропускания атмосферы на трассе от излучателя до объекта,  $T_{\text{опт}}$  – коэффициент пропускания приемной и передающей оптических систем,  $\varepsilon$  – квантовая эффективность ФПУ,  $P_l$  – мощность излучения на выходе из лазерного источника. Геометрический фактор  $\gamma$  вычисляется следующим образом (рис. 1):

$$\gamma = \frac{S_o}{S_i} \cdot \frac{S_d}{S_f}, \quad (3)$$

где  $S_o$  – ЭПО объекта,  $S_i$  – площадь пучка в плоскости объекта,  $S_f$  – площадь пучка, отраженного от объекта, на входе в приемную оптическую систему,  $S_d$  – площадь входной апертуры объектива приемной оптической системы.

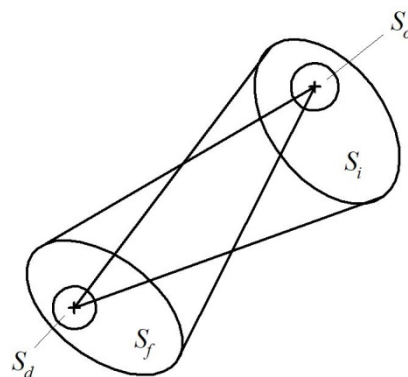


Рис. 1. Схема расширения лазерного пучка при распространении до объекта и обратно

Для надежной регистрации пришедшего сигнала его мощность должна быть выше мощности фонового излучения в несколько раз, что определяется величиной соотношения сигнал/шум для разрабатываемой ЛЛС.

Таким образом, из (2) следует, что на дистанциях свыше 3 км мощность лазерного импульса должна превышать несколько киловатт.

Площадь сканируемого пространства квадратично растет с увеличением расстояния до объекта, что требует большего количества пятен. Поэтому еще одним ограничением является частота лазерных импульсов. Количество пятен, требующихся для заполнения зондируемого пространства с углом места  $\varphi$  и азимутом  $\beta$  (рис. 2), т. е. для построения кадра сканирования, определяется по формуле

$$N = \frac{\beta\varphi}{\alpha^2}, \tag{4}$$

где  $\alpha$  – угловой диаметр пятна.

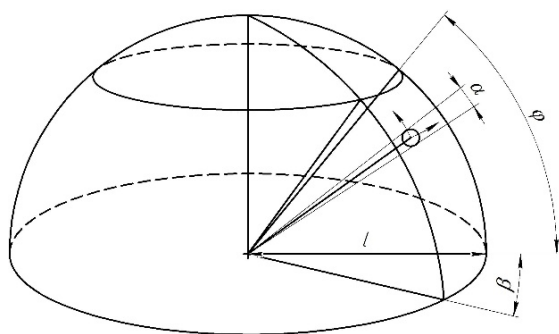


Рис. 2. Сканируемое пространство ЛЛС

Данная формула справедлива, когда пятна касаются друг друга. Для полного заполнения пространства требуется перекрытие пятен. Если учесть перекрытие пятен и отклонение пятна от прямолинейного направления вследствие неод-

нородности атмосферы, то формула (4) приобретает вид

$$N = \frac{\beta\varphi l^2}{4(1-\eta_1)(1-\eta_2)(2r-R)^2}, \tag{5}$$

где  $l$  – расстояние до объекта,  $\eta_1, \eta_2$  – коэффициенты перекрытия пятен в горизонтальной и вертикальной плоскостях,  $r$  – радиус пятна в плоскости объекта,  $R$  – радиус максимального отклонения от прямолинейного распространения вследствие неоднородностей атмосферы. Для кругового обзора  $\varphi = \pi/2, \beta = 2\pi$ . Предполагая, что кадр строится за время  $t_k$ , частота повторения импульсов равна:

$$N' = \frac{\pi^2 l^2}{4t_k(1-\eta_1)(1-\eta_2)(2r-R)^2}. \tag{6}$$

С другой стороны, максимальная частота импульсов определяется временем прохождения оптического импульса до объекта, расположенного на максимальной дальности обнаружения, и обратно. Увеличение максимальной дальности до десятков километров при неизменном угловом диаметре пятна приводит также к значительному уменьшению величины  $\gamma$  и, как следствие, возрастанию необходимой выходной мощности лазерного излучения уже до нескольких мегаватт. Поэтому снижения мощности добиваются за счет соответствующего уменьшения размера пятна  $\alpha$ , что приводит к резкому увеличению числа отдельных секторов сканирования в разрабатываемой ЛЛС, а вместе с ним и количества лазерных источников.

**Обсуждение**

На рис. 3 приведена оценка минимального количества лазеров, необходимых для обеспечения сканирования всего пространства верхней полусферы.

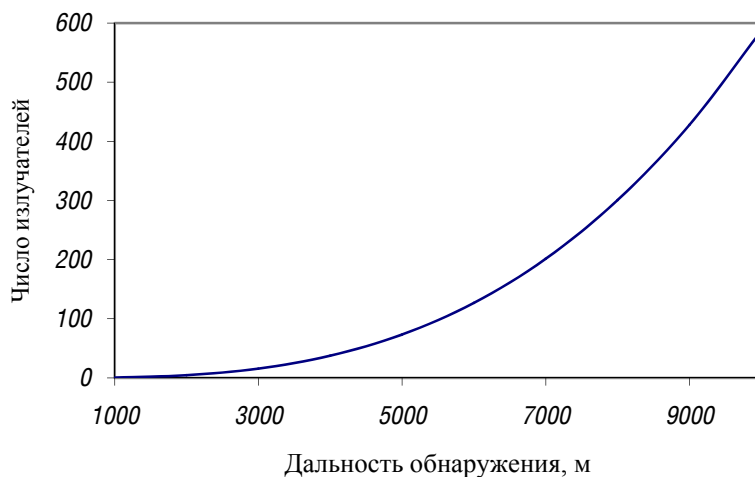


Рис. 3. Зависимость требуемого числа лазеров от дальности обнаружения БПЛА

Максимальная дальность обнаружения при пяти излучателях равна 2 км, при шестнадцати – 3 км. Для 10 км требуется почти 600 лазеров! Таким образом, приходим к выводу, что традиционные схемы одновременного сканирования и измерения расстояния до объекта при дальностях свыше 3 км невозможны.

В работе [17] предлагаются методы увеличения скорости сканирования путем использования матричных многоэлементных фотоприемников, которые позволяют не ждать возвращения отраженного сигнала. Эти методы, работающие при сравнительно небольших углах обзора по азимуту и углу места, встречают трудности при круговом сканировании на расстояниях более 5 км из-за отсутствия требуемых фотоприемников.

Для этого сканирующую систему предлагается разбить на два отдельных блока: блок определения угловых координат и блок определения дальности. Блок определения угловых координат работает независимо от блока определения дальности и определяет только направление на объект. Определение угловых координат проводится в два этапа. На первом этапе осуществляется быстрое сканирование широким пучком, угловой размер которого в итоге будет соответствовать размеру сектора, где обнаружен объект (схема построения «узкий – широкий» [18]). Затем на втором этапе осуществляется сканирование узким пучком в пределах отдельно выбранного сектора для точного обнаружения объекта в этом секторе (схема построения «узкий – узкий»).

Сканирование широким пучком при зондировании малоразмерных объектов подразумевает применение в передающей части ЛЛС мощного лазерного источника. При этом угловые координаты сектора с обнаруженным объектом соответствуют направлению сканирующего пучка, которое определяется исходя из ориентации элементов сканирующей оптической системы в момент приема отраженного сигнала одноэлементным ФПУ. Сканирование узким пучком допускает снижение мощности лазерного источника передающей части ЛЛС. Определение угловых координат объекта осуществляется за счет использования матричных ФПУ в составе приемной части ЛЛС.

В сформированном кадре грубого сканирования необходимо обеспечить предварительное распознавание типов объектов. Это позволяет значительно сократить число секторов для точного сканирования. В связи с этим возникает задача определения типа объекта по характеру

временной зависимости мощности оптического сигнала, пришедшего на ФПУ. Однако разнообразие объектов очень велико и постоянно изменяется, поэтому система должна быть способна к самообучению, что подразумевает применение методов искусственного интеллекта. Следовательно, в ходе работы ЛЛС постоянно пополняет свою базу данных, включая в нее все новые объекты.

### Выводы

Принципы и конструкция лазерных локоаторов определяются тремя основными факторами: скорость сканирования, максимальная дальность до объектов и сектор обзора. Увеличение любого из этих параметров приводит к уменьшению двух других. Частично это можно компенсировать увеличением количества излучателей. Однако расширение количества лазерных источников нецелесообразно, так как это приводит к резкому увеличению массо-габаритных характеристик разрабатываемой локационной системы, а также чрезвычайно усложнению методов регистрации оптических сигналов от разных источников и обработки результатов сканирования. Таким образом, для улучшения параметров локационных систем в части увеличения дальности сканирования, повышения точности измерения координат и скорости обнаруживаемых объектов, снижения вероятности ложной тревоги и увеличения быстродействия при обнаружении объектов требуются принципиально новые модели и методы сканирования пространства.

### Библиографические ссылки

1. Zubiaga C.J., Belcour L., Bosch C., Muñoz A., Barla P. Statistical analysis of bidirectional reflectance distribution functions // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2015. V. 9398. P. 939808 (14). DOI 10.1117/12.2083007.
2. Zhang H., Wang B. Three-dimensional laser radar range imagery of complex target with rough surfaces // Progress In Electromagnetics Research M. 2018. V. 73, P. 17-24. DOI 10.2528/PIERM18050902.
3. Li D., Xu L., Xie X., Li X., Chen J., Chen J. Copath full-waveform LiDAR for detection of multiple along-path objects // Optics and Lasers in Engineering. 2018. V. 111. P. 211-221. DOI 10.1016/j.optlaseng.2018.08.009.
4. Carrea D., Abellan A., Humair F., Matasci B., Derron M.-H., Jaboyedoff M. Correction of terrestrial LiDAR intensity channel using Oren–Nayar reflectance model: An application to lithological differentiation // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 113. P. 17-29. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2015.12.004.
5. Сверхбыстрое сканирование пространства импульсным chirпированным лазерным излучением /

В. А. Малинов, Н. И. Павлов, А. В. Чарухчев // Оптический журнал. 2019. Т. 86, № 8. С. 83-89. DOI 10.17586/1023-5086-2019-86-08-83-89.

6. Васильев В. П. Современное состояние высокоточной лазерной дальнометрии // Успехи физических наук. 2018. Т. 188, № 7. С. 790–797. DOI 10.3367/UFNr.2017.04.038147.

7. Germer T.A. Full four-dimensional and reciprocal Mueller matrix bidirectional reflectance distribution function of sintered polytetrafluoroethylene // Applied Optics. 2017. V. 56, № 33. P. 9333-9340. DOI 10.1364/AO.56.009333.

8. Wang K., Zhu J.-P., Liu H., Hou X. Model of bidirectional reflectance distribution function for metallic materials // Chinese Physics B. 2016. V. 25. № 9. P. 094201. DOI 10.1088/1674-1056/25/9/094201.

9. Yang M., Xu W., Li J., Zhou Z., Lu Y. A modified version of BRDF model based on Kubelka-Munk theory for coating materials // Optika. 2019. V. 193. P. 162982. DOI 10.1016/j.ijleo.2019.162982.

10. Chen L., Ren Z., Ma C., Chen G. Modeling and simulating the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of seawater polluted by oil emulsion // Optika. 2017. V. 140. P. 878-886. DOI 10.1016/j.ijleo.2017.05.022.

11. Лабунец Л. В., Борзов А. Б., Ахметов И. М. Регуляризованная параметрическая модель индикатрисы коэффициента яркости шероховатой поверхности // Оптический журнал. 2019. Т. 86, № 10. С. 20–29. DOI 10.17586/1023-5086-2019-86-10-20-29.

12. Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса : учеб. пособие. М. : Геолидар, Геокосмос, 2007. 230 с.

13. Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М. Основы импульсной лазерной локации. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 571 с.

14. Военные применения лазеров: учебное пособие / В. А. Борейшо, Д. В. Клочков, М. А. Коняев, Е. Н. Никулин. СПб. : Балт. гос. тех. ун-т, 2015. 103 с.

15. Мусьяков М. П., Миценко И. Д., Ванев Г. Г. Проблемы ближней лазерной локации. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 296 с.

16. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М.: URSS: ЛКИ, 2009. 240 с.

17. Высокопроизводительный метод измерений координат объектов в условиях космического пространства / Н. А. Грязнов, С. М. Панталеев, А. Е. Иванов, Д. А. Кочкарев, Д. С. Куликов // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2013. Т. 2. С. 197–202.

18. Карасик В. Е., Орлов В. М. Локационные лазерные системы видения. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 478 с.

## References

1. Zubiaga C.J., Belcour L., Bosch C., Muñoz A., Barla P. Statistical analysis of bidirectional reflectance distribution functions. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2015, vol. 9398, pp. 939808 (14). DOI 10.1117/12.2083007.

2. Zhang H., Wang B. Three-dimensional laser radar range imagery of complex target with rough surfaces. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2018, vol. 73, pp. 17-24. DOI 10.2528/PIERM18050902.

3. Li D., Xu L., Xie X., Li X., Chen J., Chen J. Copath full-waveform LiDAR for detection of multiple along-path objects. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 111, pp. 211-221. DOI 10.1016/j.optlaseng.2018.08.009.

4. Carrea D., Abellan A., Humair F., Matasci B., Derron M.-H., Jaboyedoff M. Correction of terrestrial LiDAR intensity channel using Oren–Nayar reflectance model: An application to lithological differentiation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, vol. 113, pp. 17-29. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2015.12.004.

5. Malinov V.A., Pavlov N.I., Charukhchev A.V. [Ultrafast scanning of space with pulsed chirped laser radiation]. *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, no. 8. pp. 83-89 (in Russ.). DOI 10.17586/1023-5086-2019-86-08-83-89.

6. Vasil'ev V.P. [Current state of high-accuracy laser ranging]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2018, vol. 188, no. 7. pp. 790-797 (in Russ.). DOI 10.3367/UFNr.2017.04.038147.

7. Germer T.A. Full four-dimensional and reciprocal Mueller matrix bidirectional reflectance distribution function of sintered polytetrafluoroethylene. *Applied Optics*, 2017, vol. 56, no. 33, pp. 9333-9340. DOI 10.1364/AO.56.009333.

8. Wang K., Zhu J.-P., Liu H., Hou X. Model of bidirectional reflectance distribution function for metallic materials. *Chinese Physics B*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 094201. DOI 10.1088/1674-1056/25/9/094201.

9. Yang M., Xu W., Li J., Zhou Z., Lu Y. A modified version of BRDF model based on Kubelka-Munk theory for coating materials. *Optika*, 2019, vol. 193, pp. 162982. DOI 10.1016/j.ijleo.2019.162982.

10. Chen L., Ren Z., Ma C., Chen G. Modeling and simulating the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of seawater polluted by oil emulsion. *Optika*, 2017, vol. 140, pp. 878-886. DOI 10.1016/j.ijleo.2017.05.022.

11. Labunets L.V., Borzov A.B., Akhmetov I.M. [Regularized parametric model of indicatrix of brightness coefficient of roughness surface]. *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, no 10, pp. 20-29 (in Russ.). DOI 10.17586/1023-5086-2019-86-10-20-29.

12. Medvedev E.M., Danilin I.M., Mel'nikov S.R. *Lazernaya lokatsiya zemli i lesa: Uchebnoe posobie* [Laser ranging of land and forest: Handbook]. Moscow, Geolidar, Geokosmos Publ., 2007, 230 p. (in Russ.).

13. Kozintsev V. I., Belov M.L., Orlov V.M. *Osnovy impul'snoi lazernoi lokatsii* [Fundamentals of pulsed laser ranging]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010, 571 p. (in Russ.).

14. Boreisho V.A., Klochkov D.V., Konyaev M.A., Nikulin E.N. *Voennye primeneniya lazerov: uchebnoe posobie* [Military applications of lasers: Handbook]. Saint-Petersburg, Baltic State Technical University Publ., 2015, 103 p. (in Russ.).

15. Mus'yakov M.P., Mitsenko I.D., Vaneev G.G. *Problemy blizhnei lazernoj lokatsii* [Problems of close-range laser ranging]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000, 296 p. (in Russ.).

16. Kharkevich A.A. *Spektry i analiz* [Spectra and analysis]. Moscow, URSS: LKI Publ., 2009, 240 p. (in Russ.).

17. Gryaznov N.A., Pantaleev S.M., Ivanov A.E., Kochkarev D.A., Kulikov D.S. [High-performance measuring method of object coordinates in outer space]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU*, 2013, vol. 2, pp. 197-202. (in Russ.).

18. Karasik V.E., Orlov V.M. *Lokatsionnye lazernye sistemy videniya* [Laser ranging vision systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013, 478 p. (in Russ.).

\*\*\*

### Laser Locator for Detection and Recognition of Small Objects

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

*M. R. Zaripov*, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

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

*There is a problem of quick detecting of small-sized air objects in addition to searching for a large aircraft such as airplanes or helicopters in design of modern locators, this problem forces the developers of these systems to use laser sources for ranging of air space. The objective of work is to study the possibility of using laser sources for the ranging of small-sized objects, and also to study the requirements for laser locators and of the problems associated with the changing of the radio spectral range to the optical one. The problem of detecting small-sized airborne objects and the issue of constructing laser locators of all-round range-finding are considered in the paper. Methods for range-finding to objects and measuring of their angular coordinates, which are used in these systems, are described. The estimated composition of the designed system is given and main functions of its parts and interactions between these parts are noted. The estimate of the required laser radiation power and the dependence of the number of laser sources in the system on the maximum range-finding distance are presented. A method for solving this problem by dividing the system into a block for determining angular coordinates and a block for determining range is proposed.*

**Keywords:** laser locator, scanning device, distance of range-finding, laser source, recognition of objects, detection of objects.

Получено: 21.11.2019