

УДК 551.501.816:681.2

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-2-136-144

## Проектирование приемопередающей части двухканальной лидарной системы ИК-диапазона

С. А. Садовников<sup>1</sup>\*, С. В. Яковлев<sup>1</sup>, Н. С. Кравцова<sup>1</sup>, М. П. Герасимова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

\* e-mail: sadsa@iao.ru

**Аннотация.** Исследование направлено на определение оптимальных параметров элементов двухканальной лидарной системы ближнего ИК-диапазона. Одним из первых этапов при проектировании и разработке лидарных систем, решающих задачи дистанционного газоанализа атмосферы, является расчет функции перекрытия. В рамках исследования проведено численное моделирование функции перекрытия лидарной системы при различных конфигурациях приемопередающего тракта. Результаты моделирования показали, что при использовании в приемной части лидара телескопа Мерсенна с заданными параметрами предпочтительно фокусировать лазерное излучение на удалении от передающего тракта для получения полного перекрытия поля зрения телескопа и лазерного пучка с минимизацией «мертвой» зоны работы лидара. Полученные результаты в дальнейшем будут применены при разработке конструкции двухканальной лидарной системы для измерения концентраций парниковых газов в атмосфере.

**Ключевые слова:** лидар, лазерное зондирование, углекислый газ, водяной пар, функция перекрытия, телескоп Мерсенна, биаксиальная схема

### *Введение*

Активная промышленная деятельность и антропогенное воздействие на окружающую среду приводят к значительному повышению концентрации углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в атмосфере Земли, усилению парникового эффекта, таянию ледников, вечной мерзлоты и, соответственно, высвобождению большого количества водяного пара (H<sub>2</sub>O). В связи с этим актуально проведение всесторонних исследований и разработка новых методик, подходов и приборов для контроля концентраций этих газовых компонент атмосферы. Наиболее распространенным подходом при решении подобных задач является пробортборный метод с использованием локальных газоаналитических приборов [1, 2]. К минусам данного подхода можно отнести очевидное ограничение – измерение может быть

проведено лишь в одной точке пространства. Для решения задач дистанционного контроля распределения газов на некотором удалении от измерителя активно применяются лидарные методы [3, 4]. В Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева (ИОА СО РАН) активно разрабатываются лидарные системы дистанционного газоанализа атмосферы [5–8].

В настоящее время проводятся работы по созданию двухканальной лидарной системы для измерения концентраций парниковых газов в атмосфере. Одним из первых этапов при проектировании и разработке лидарных систем, решающих задачи дистанционного газоанализа атмосферы, является расчет функции перекрытия. В рамках исследования проведено численное моделирование функции перекрытия лидарной системы при различных конфигурациях приемопередающего

тракта для подбора оптимальных геометрических параметров его элементов.

**Результаты численного моделирования функции перекрытия лидарной системы**

Функция перекрытия ( $\xi$ ) поля зрения приемника и лазерного пучка лидарной системы количественно определяет с разрешением по дальности количество фотонов, достигающих детектора, нормализованное к числу фотонов обратного рассеяния, попадающих на апертуру телескопа [9, 10].

Расчет функции перекрытия  $\xi$  является одним из первых этапов при проектировании и разработке лидарных систем, решающих задачи дистанционного газоанализа атмосферы. При создании лидарной системы для измерения концентраций парниковых газов в атмосфере предполагается использование двух каналов регистрации лазерного излучения, основанных на методе дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР) и дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС). Первый канал раз-

рабатываемой системы (ДПР-канал) необходим для регистрации пространственно-разрешенных обратно рассеянных сигналов на длинах волн зондирования целевых газов. Второй канал (ДОАС) – для регистрации диффузно-отраженных сигналов от топографических целей. Расчет функции перекрытия существенно зависит от большого набора параметров лидарной системы и в связи с этим решение данной задачи имеет актуальный характер [10, 11].

Основными входными данными при расчете функции перекрытия биаксиального лидара являются: радиус пучка лазерного излучения ( $W_0$ ), расходимость лазерного излучения, радиус приемной апертуры телескопа ( $r_0$ ), расстояние между центрами осей лазерного пучка и приемной апертуры телескопа ( $d_0$ ), угол наклона между осями лазерного пучка и приемной апертуры телескопа, диаметр полевой диафрагмы или диаметр чувствительной зоны фотодетектора (ФД). На рис. 1 показана биаксиальная схема лидара для случая частичного перекрытия полей зрения телескопа и лазерного пучка.

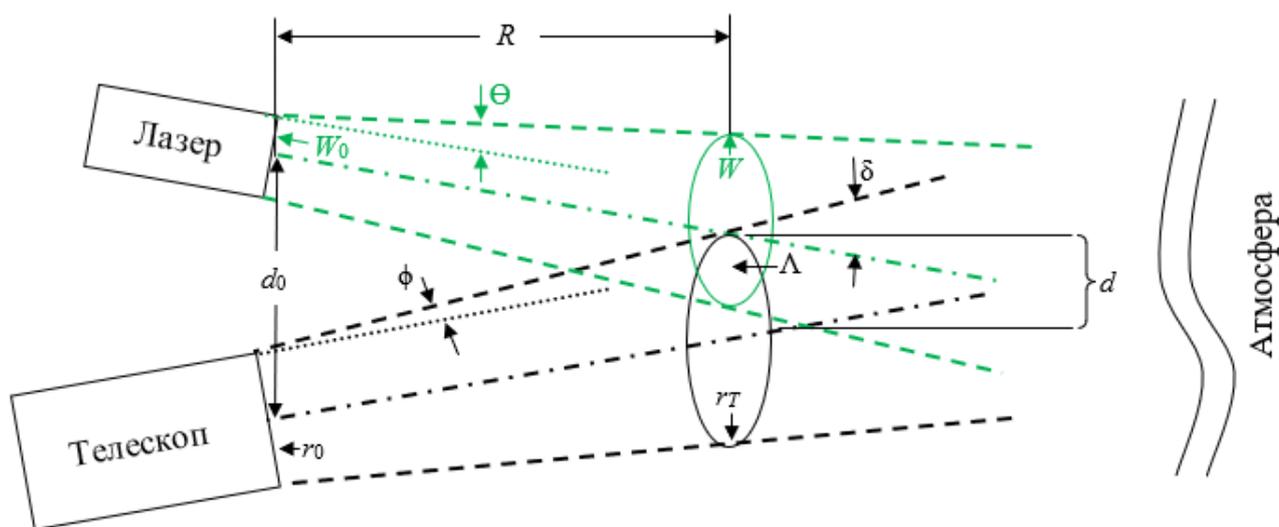


Рис. 1. Биаксиальная схема лидара для случая частичного перекрытия полей зрения телескопа и лазерного пучка:

$r_0$  – радиус телескопа;  $W_0$  – радиус лазерного пучка;  $d_0$  – расстояние между центрами осей лазерного пучка и приемной апертуры телескопа;  $\theta$  – полуугол расходимости лазерного излучения;  $r_T$  – радиус поля зрения оптической приемной системы в плоскости исследуемого объекта;  $W$  – радиус лазерного пучка в плоскости исследуемого объекта;  $\Lambda$  – область перекрытия в плоскости исследуемого объекта между полем зрения телескопа и лазерного пучка;  $\phi$  – полуугол расходимости поля зрения телескопа;  $R$  – расстояние до исследуемого объекта

Для расчета функции перекрытия биаксиальной лидарной системы и подбора оптимальных геометрических параметров элементов в приемопередающей части проведено численное моделирование с входными данными, представленными в табл. 1. В приемной части разрабатываемого лидара планируется использование телескопа, сконструированного по схеме Мерсенна [12], изготовленного в ИОА СО РАН. Диаметр приемной апертуры телескопа  $D = 300$  мм. Необходимо отметить, что особенность данного телескопа состоит в формировании параллельного пучка. В случае использования классической схемы приемного блока лидара, например, с телескопами Кассегрена, Ньютона с заданным эффективным фокусным расстоянием ( $F$ ), поле зрения системы определяется диа-

метром полевой диафрагмы, установленной в фокусе  $F$  [9]. В свою очередь, при применении схемы Мерсенна возникает необходимость использования дополнительных оптических элементов для фокусировки рассеянного из атмосферы или топографических целей излучения. В нашем случае, поле зрения телескопа определяется не только характеристиками самого телескопа, но и параметрами дополнительных параболических фокусирующих зеркал и диаметром фотоприемника без необходимости использования полевой диафрагмы, т. е. диаметр площадки фотодетектора выступает в роли апертуры диафрагмы. По этой причине в таблице диаметр полевой диафрагмы и чувствительной площадки ФД рассматриваются в качестве эквивалентных параметров.

Входные данные для проведения моделирования функции перекрытия биаксиального лидара

Параметр	Значение
Длина трассы зондирования, км	3
Шаг зондирования, км	0,01
Радиус приемной апертуры телескопа ( $r_0$ ), мм	150
Радиус лазерного пучка передающей части лидара ( $W_0$ ), мм	2; 10; 50
Расстояние между центрами осей лазерного пучка и приемной апертуры телескопа ( $d_0$ ), мм	200
Расходимость лазерного излучения без коллимации, мрад	2
Коэффициент увеличения коллиматора	5
Угол наклона между осями лазерного пучка и приемной апертуры телескопа, мрад	0; 0,1; 0,2; 0,3
Диаметр полевой диафрагмы / чувствительной площадки ФД, мм	0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1
Фокусное расстояние параболических зеркал для фокусировки обратно рассеянного сигнала на площадку ФД, мм	101,6

Функция перекрытия может быть посчитана с применением следующего подхода [9, 10, 13]

$$\xi = \begin{cases} 0 & d > r_1 + r_2 \\ \frac{\min(r_1, r_2)^2}{r_2^2} & d < |r_1 - r_2| \\ \frac{r_1^2 (\Phi_1 - \sin(\Phi_1)) / 2 + r_2^2 (\Phi_2 - \sin(\Phi_2)) / 2}{\pi r_2^2} & |r_1 - r_2| < d < r_1 + r_2 \\ 1 & r_1 > d + r_2 \end{cases},$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  определены как

$$\Phi_1 = \arccos\left(\frac{r_1^2 + d^2 - r_2^2}{2r_1d}\right);$$

$$\Phi_2 = \arccos\left(\frac{r_2^2 + d^2 - r_1^2}{2r_2d}\right).$$

Расчет функции перекрытия проведен с использованием программных модулей, разработанных с применением языков программирования Python [14] и C# [15]. На рис. 2 представлен интерфейс программы моделирования функции перекрытия.

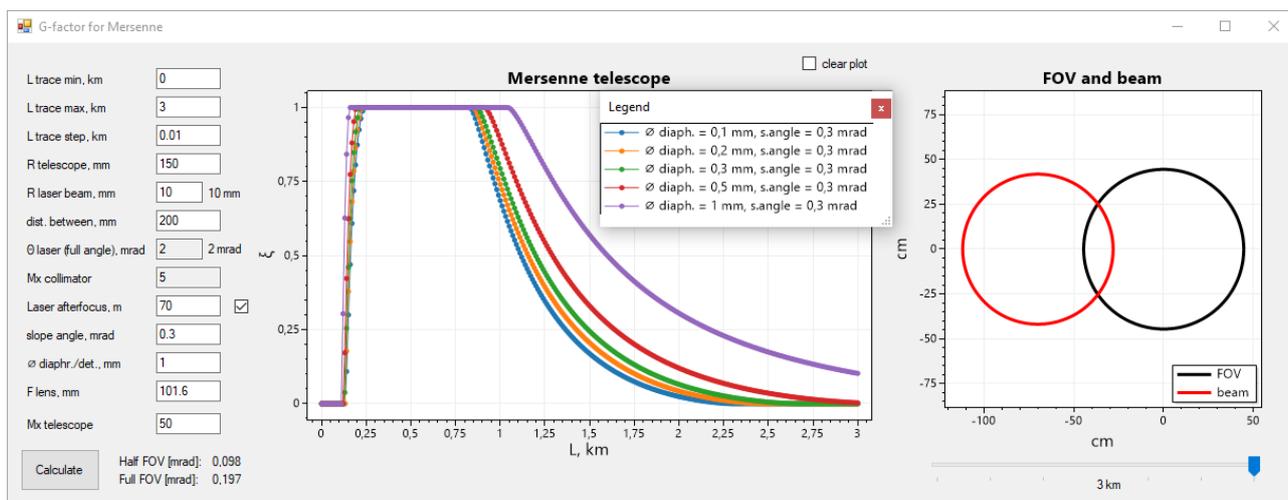


Рис. 2. Интерфейс программы моделирования функции перекрытия:

слева-направо располагаются: панель ввода параметров для расчета функции перекрытия; результаты моделирования при различных заданных входных параметрах; цифровая визуализация перекрытия поля зрения телескопа (field-of-view (FOV)) и лазерного пучка (beam))

При моделировании рассмотрены конфигурации системы с различными углами наклона между осями лазерного пучка и приемной апертуры телескопа (0; 0,1; 0,2; 0,3 и 1 мрад), и апертурами ФД (0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1 мм):

- 1) без фокусировки лазерного пучка, диаметр пучка 2 мм (без коллимации);
- 2) без фокусировки лазерного пучка, диаметр пучка 10 мм (с коллимацией).

Необходимо отметить, что наряду с рассмотрением случаев с параллельными и слаборасходящимися лазерными пучками проведен расчет для фокусировки лазерного излучения на удалении от передающего тракта лидара на расстояниях 70 м (диаметр пучка 10 мм) и 1 000 м (диаметр пучка 50 мм) [16]. На рис. 3–6 представлены результаты моделирования.

Расстояние оптимальной фокусировки ( $z$ ) определяется следующей формулой [14]:

$$z = \frac{\pi W_0^2}{\lambda},$$

где  $W_0$  – радиус лазерного пучка;  $\lambda$  – длина волны зондирования, мкм.

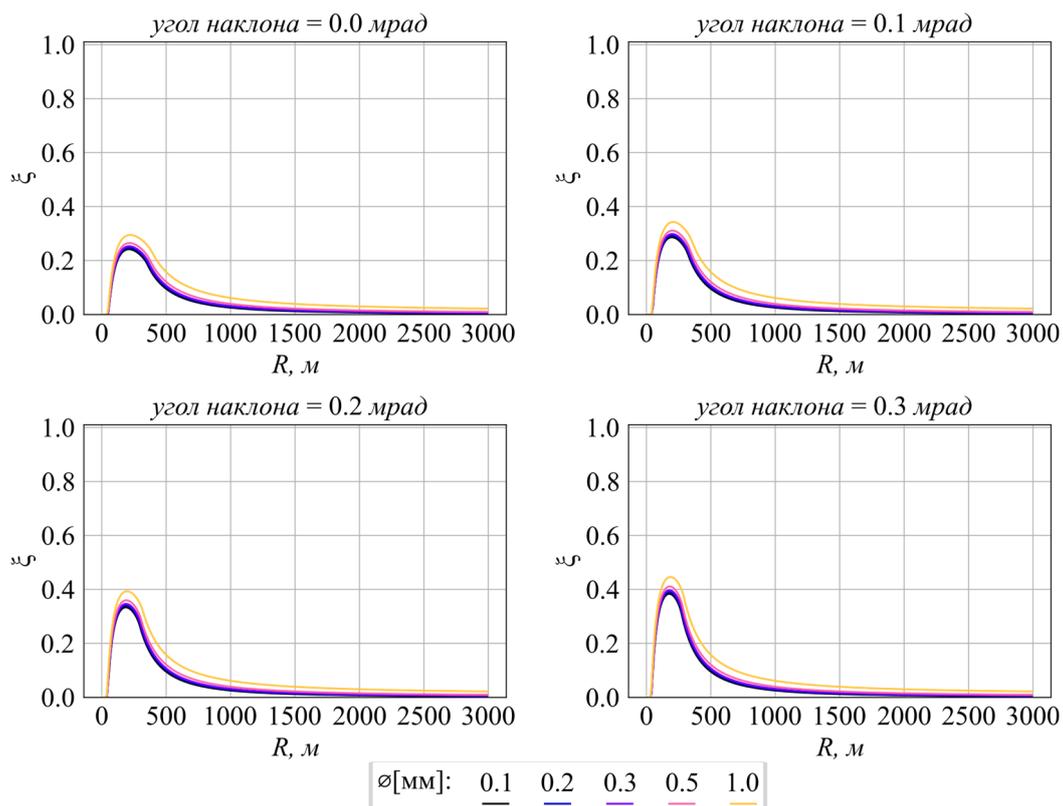


Рис. 3. Результаты расчета функции перекрытия (без фокусировки, диаметр пучка 2 мм, без коллимации, расходимость 2 мрад)

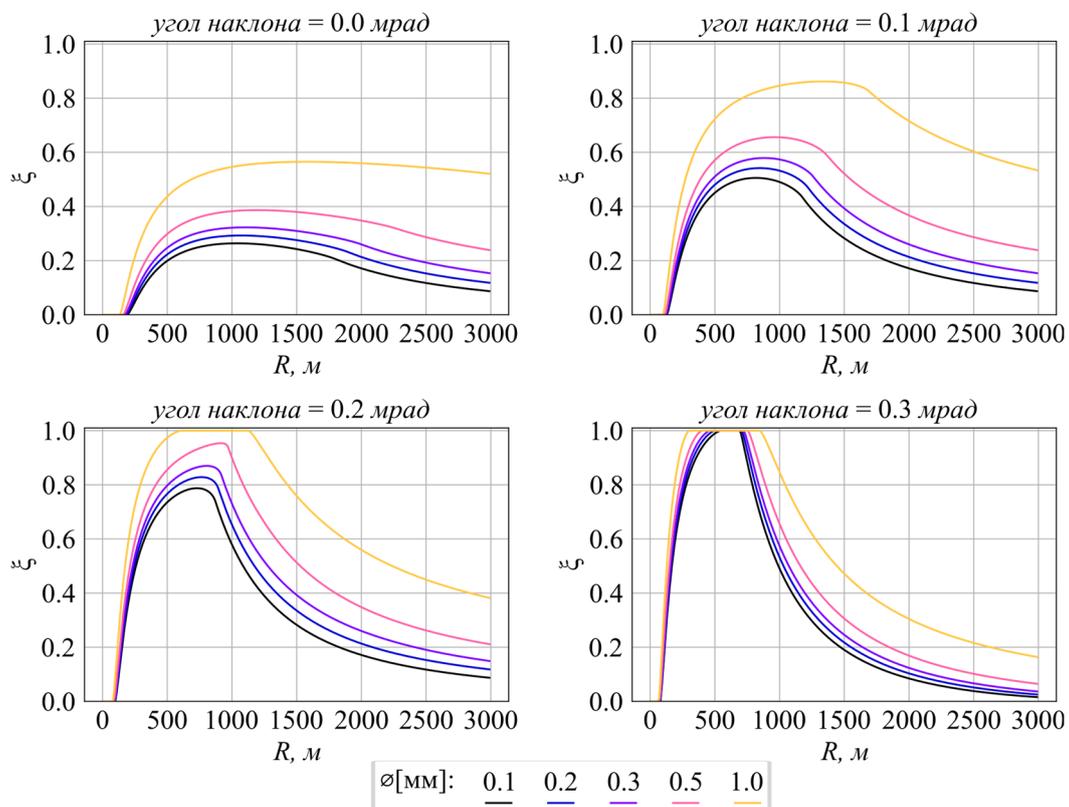


Рис. 4. Результаты расчета функции перекрытия (без фокусировки, диаметр пучка 10 мм, с коллимацией, расходимость 0,4 мрад)

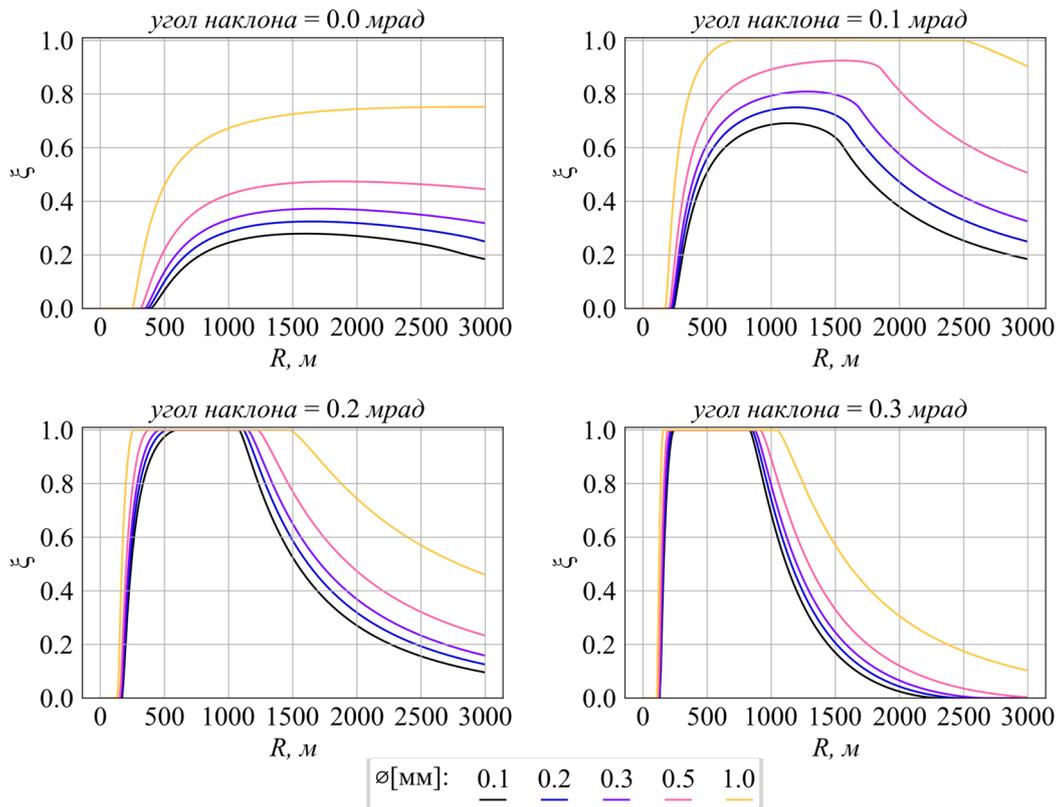


Рис. 5. Результаты расчета функции перекрытия (с фокусировкой лазерного пучка – 70 м, диаметр пучка 10 мм)

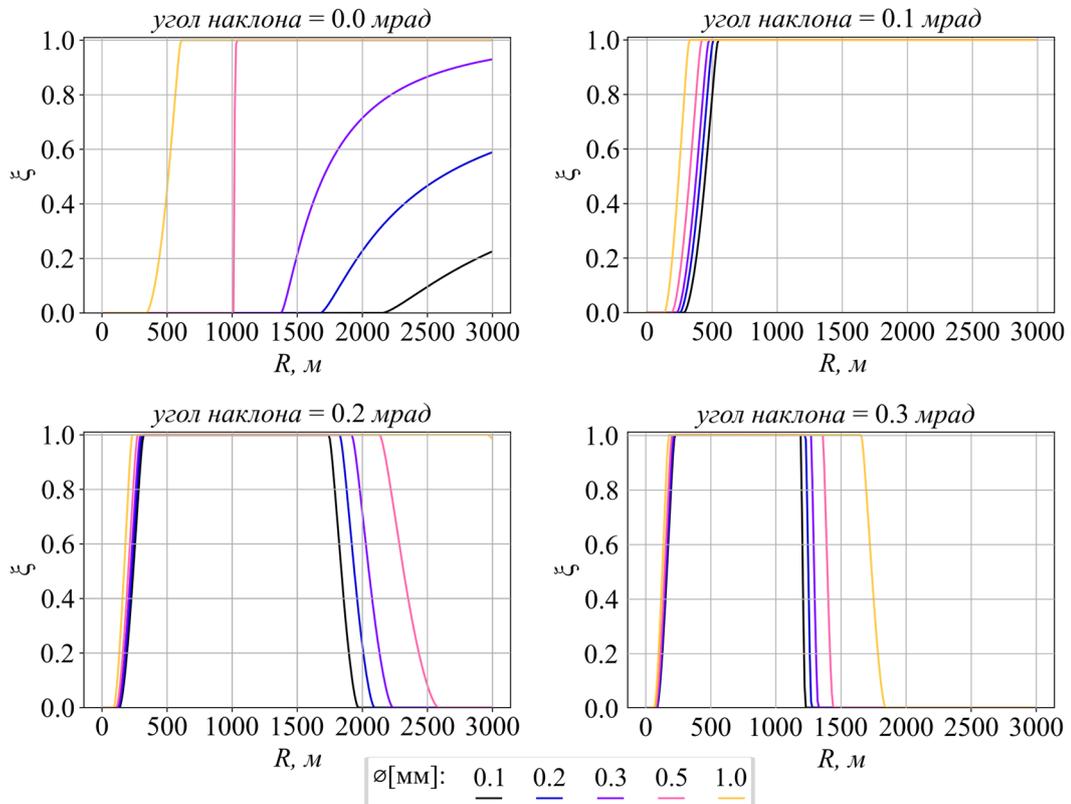


Рис. 6. Результаты расчета функции перекрытия (с фокусировкой лазерного пучка – 1 000 м, диаметр пучка 50 мм)

Таким образом, по результатам численного моделирования функции перекрытия биаксиального лидара определены его «мертвая» зона работы, минимальная и максимальная дальность зондирования при различных конфигурациях системы. На основе анализа результатов моделирования определены оптимальные геометрические параметры приемопередающей части лидара для различных сценариев измерений. Очевидно, что при разработке ДПР и ДОАС каналов регистрации на основе одного телескопа для надежной регистрации отраженных от топоцелей сигналов с полным перекрытием апертуры телескопа и лазерного пучка в наибольшей степени подходят конфигурации с фокусировкой лазерного излучения на заданном удалении от передающего тракта (см. рис. 5, 6).

### Заключение

Проведено численное моделирование функции перекрытия лидарной системы при различных конфигурациях приемопередающего тракта: без применения коллимации, с коллимацией и с фокусировкой лазерного излучения. Рассмотрены различные конфигурации с использованием углов наклона между осями лазерного пучка и приемной апертуры телескопа (0; 0,1, 0,2; 0,3 и 1 мрад), и апертурами ФД (0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1 мм). Результаты моделирования показали, что при использовании в приемной части лидара телескопа Мерсенна с заданными параметрами предпочтительно фокусировать лазерное излучение на удалении от передающего тракта для получения полного перекрытия поля зрения телескопа и лазерного пучка с минимизацией «мертвой» зоны работы лидара.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10203, <https://rscf.ru/project/22-79-10203/>.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Piccaro [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.picarro.com/> (accessed 03.02.2023).
2. Scherer J. J., Paul J. B., Thiebaud J., So S. MIRA: A New, Ultrasensitive, Middle Infrared Laser-Based «Lab in a Lunchbox» // Conference: Optics and Photonics for Sensing the Environment. – 2019. – DOI 10.1364/ES.2019.ETu2A.1
3. Yu S., Zhang Z., Li M., Xia H. Multi-frequency differential absorption lidar incorporating a comb-referenced scanning laser for gas spectrum analysis // Optics Express. – 2021. – Vol. 29, No. 9. – P. 12984–12995.
4. Айрапетян В. С., Шабурова А. В. Идентификация тринитротолуола (TNT) в дальней ИК-области с помощью параметрического лазера // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 3. – С. 157–163.
5. Баженов О. Е., Невзоров А. А., Невзоров А. В., Долгий С. И., Макеев А. П. Возмущение стратосферы над Томском зимой 2017/2018 гг. по данным лидарных и спутниковых (Aura MLS/OMI) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33, № 07. – С. 509–515.
6. Yakovlev S. V., Sadovnikov S. A., Romanovskii O. A. Mobile Airborne Lidar for Remote Methane Monitoring: Design, Simulation of Atmospheric Measurements and First Flight Tests // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, No. 24. – P. 6355.
7. Yakovlev S., Sadovnikov S., Kharchenko O., Kravtsova N. Remote sensing of atmospheric methane with IR OPO lidar system // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11, No. 1. – P. 70.
8. Садовников С. А., Романовский О. А., Яковлев С. В., Харченко О. В., Кравцова Н. С. Калибровка и полевые испытания мобильного лидара для дистанционного зондирования метана в атмосфере // Оптический журнал – 2022. – Т. 89, № 6. – С. 15–24.
9. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М. : Мир, 1987. – 550 с.
10. Mao F., Gong W., Li J. Geometrical form factor calculation using Monte Carlo integration for lidar // Optics & Laser Technology. – 2012. – Vol. 44, No. 4. – С. 907–912.
11. Бобровников С. М., Горлов Е. В., Жарков В. И. Многоапертурная приемопередающая система лидара с узким полем зрения и минимальной мертвой зоной зондирования // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 07. – С. 551–558.

12. Разенков И. А. Анализ технических решений при проектировании турбулентного лидара // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 09. – С. 766–776.
13. Halldorsson T., Langerholc J. Geometrical form factors for the lidar function // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17, No. 2. – С. 240–244.
14. Welcome to Python.org [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.python.org/> (accessed 03.02.2023).
15. NET Developer Community [Electronic resource]. – Mode of access: <https://dotnet.microsoft.com/en-us/platform/community> (accessed 03.02.2023).
16. Gaussian Beam Optics [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.newport.com/n/gaussian-beam-optics> (accessed 03.02.2023).

### Об авторах

*Сергей Александрович Садовников* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией мониторинга парниковых газов.

*Семён Владимирович Яковлев* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией прогнозирования состояния атмосферы.

*Наталья Сергеевна Кравцова* – младший научный сотрудник лаборатории прогнозирования состояния атмосферы.

*Марианна Петровна Герасимова* – техник лаборатории мониторинга парниковых газов.

Получено 07.02.2023

© С. А. Садовников, С. В. Яковлев, Н. С. Кравцова, М. П. Герасимова, 2023

## Designing the transceiver part of a two-channel infrared lidar system

*S. A. Sadovnikov<sup>1</sup>\*, S. V. Yakovlev<sup>1</sup>, N. S. Kravtsova<sup>1</sup>, M. P. Gerasimova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

\* e-mail: [sadsa@iao.ru](mailto:sadsa@iao.ru)

**Abstract.** The study is aimed at determining the optimal parameters of the elements of a two-channel near-IR lidar system. One of the first stages in the design and development of lidar systems that solve the problems of remote gas analysis of the atmosphere is the calculation of the overlap function. As part of the study, numerical simulation of the overlapping function of the lidar system was carried out for various configurations of the transceiver path. The simulation results showed that when using a Mersenne telescope with specified parameters in the receiving part of the lidar, it is preferable to focus the laser radiation at a distance from the transmitting path in order to obtain a complete overlap of the field of view of the telescope and the laser beam while minimizing the "dead" zone of the lidar operation. The results obtained will be further applied in the development of the design of a two-channel lidar system for measuring the concentrations of greenhouse gases in the atmosphere.

**Keywords:** lidar, remote sensing, carbon dioxide, water vapor, overlap function, Mersenne telescope, biaxial scheme

### REFERENCES

1. Piccaro. (n. d.). Retrieved from <https://www.picarro.com/> (accessed February 03, 2023).
2. Scherer, J. J., Paul, J. B., Thiebaud, J., & So, S. (2019). MIRA: A New, Ultrasensitive, Middle Infrared Laser-Based "Lab in a Lunchbox". *Conference: Optics and Photonics for Sensing the Environment*. doi: 10.1364/ES.2019.ETu2A.1.
3. Yu, S., Zhang, Z., Li, M., & Xia, H. (2021). Multi-frequency differential absorption lidar incorporating a comb-referenced scanning laser for gas spectrum analysis. *Optics Express*, 29(9), 12984–12995.
4. Ayrapetyan, V. S., & Shaburova, A. V. (2022). Identification of trinitrotoluene (TNT) in the far IR region using a parametric laser. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(3), 157–163 [in Russian].

5. Bazhenov, O. E., Nevzorov, A. A., Nevzorov, A. V., Dolgii S. I., & Makeev, A. P. (2020). Disturbance of the Stratosphere over Tomsk during Winter 2017/2018 Using Lidar and Aura MLS/OMI Observations. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 33(6), 622–628.
6. Yakovlev, S. V., Sadovnikov, S. A., & Romanovskii, O. A. (2022). Mobile Airborne Lidar for Remote Methane Monitoring: Design, Simulation of Atmospheric Measurements and First Flight Tests. *Remote Sensing*, 14(24), 6355.
7. Yakovlev S., Sadovnikov S., Kharchenko O., & Kravtsova N. (2020). Remote sensing of atmospheric methane with IR OPO lidar system. *Atmosphere*, 11(1), 70.
8. Sadovnikov, S. A., Romanovskii, O. A., Yakovlev, S. V., Kharchenko, O. V., & Kravtsova, N. S. (2022). Calibration and field test of mobile lidar for remote sensing of atmospheric methane. *Journal of Optical Technology*, 89(6), 320–326.
9. Measures, R. M. (1984). *Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
10. Mao, F., Gong, W., & Li, J. (2012) Geometrical form factor calculation using Monte Carlo integration for lidar. *Optics & Laser Technology*, 44(4), 907–912.
11. Bobrovnikov, S. M., Gorlov, E. V., & Zharkov, V. I. (2018). A Multi-Aperture Transceiver System of a Lidar with Narrow Field of View and Minimal Dead Zone. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 31(6), 690–697.
12. Razenkov, I. A. (2022). Analysis of technical solutions in the design of a turbulent lidar. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 35(9), 766–776 [in Russian].
13. Halldorsson, T., & Langerholc, J. (1978). Geometrical form factors for the lidar function. *Applied Optics*, 17(2), 240–244.
14. Welcome to Python.org. (n. d.). Retrieved from <https://www.python.org/> (accessed February 03, 2023).
15. NET Developer Community. (n. d.). Retrieved from <https://dotnet.microsoft.com/en-us/platform/community> (accessed February 03, 2023).
16. Gaussian Beam Optics. (n. d.). Retrieved from <https://www.newport.com/n/gaussian-beam-optics> (accessed February 03, 2023).

#### Author details

*Sergey A. Sadovnikov* – Ph. D., Head of the Laboratory of Greenhouse Gas Monitoring.

*Semyon V. Yakovlev* – Ph. D., Head of the Laboratory for Atmospheric Prediction.

*Natalya S. Kravtsova* – Junior Researcher, Laboratory for Atmospheric Prediction.

*Marianna P. Gerasimova* – Technician, Laboratory of Greenhouse Gas Monitoring.

Received 07.02.2023

© S. A. Sadovnikov, S. V. Yakovlev, N. S. Kravtsova, M. P. Gerasimova, 2023