

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.31

Многоапертурная приемопередающая система лидара с узким полем зрения и минимальной мертвой зоной зондирования

С.М. Бобровников^{1,2}, Е.В. Горлов^{1,2}, В.И. Жарков^{1*}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 14.05.2018 г.

Определены требования к приемопередающей системе СКР-лидара, предназначенного для решения задач исследования пограничного слоя атмосферы и прогнозирования опасности смогообразования. Проведен синтез оптической схемы приемопередающей системы лидара с узким полем зрения и минимальной мертвой зоной. Представлены результаты компьютерного моделирования геометрических функций лидара, полученных методом трассировки лучей для нескольких вариантов оптической схемы приемной оптической системы. Показано, что при использовании многоэлементного приемопередатчика на основе комбинации четырех приемных апертур различного диаметра может быть получен диапазон дальности зондирования лидара от 5 до 3000 м при динамическом диапазоне лидарного отклика не более 10.

Ключевые слова: лидар, приемопередатчик, температура, атмосфера, световод; lidar, transceiver system, temperature, atmosphere, optical fiber.

Введение

Вскоре после создания первых лазеров были предприняты попытки построения первых лазерных локаторов для зондирования атмосферы и окружающей среды. За многолетнюю историю развития средств лазерного зондирования было создано множество устройств различного назначения, которые нашли применение в разных областях деятельности человека. При этом неотъемлемой частью и основой всех систем лазерной локации являются источник и приемник оптического излучения, которые во многом определяют энергетический и информационный потенциалы лазерного локатора. Основная функция передающей системы лазерного локатора — формирование оптического пучка заданной расходимости и передача его в заданном направлении. Назначение приемной оптической системы состоит в том, чтобы с минимальными потерями собрать рассеянное назад излучение со всех участков трассы зондирования, обеспечив при этом минимальный угол поля зрения. Наиболее распространенным примером построения приемной оптической системы лазерного локатора или лидара является использование некоторого объектива, в фокусе которого устанавливается полевая диафрагма, определяющая угол поля зрения. Объектив строит

изображение рассеивающего объема в плоскости изображения. Если плоскость изображения не совпадает с плоскостью установки полевой диафрагмы, то очевидно, что не все лучи, строящие изображение, пройдут через диафрагму и дойдут до фотодетектора. Поскольку дальность до рассеивающего объема при распространении лазерного импульса по трассе зондирования изменяется от нуля до бесконечности, то и положение плоскости изображения сильно меняется. Этот механизм приводит к появлению зависимости эффективности сбора оптического сигнала от дальности до рассеивающего объема. Функцию, характеризующую эффективность сбора, называют геометрическим фактором лидара. Данный фактор — неотъемлемая характеристика приемопередающей системы лидара [1–6].

Основной проблемой, возникающей из-за существования геометрического фактора, является наличие мертвой зоны на трассе зондирования вблизи лидара, откуда оптические сигналы не доходят до приемника. С практической точки зрения этот участок трассы часто бывает очень полезен при проведении измерений, например для калибровки лидара в нижней точке трассы. Прямой путь сокращения мертвой зоны лидара — увеличение угла поля зрения приемной оптической системы. Этим приемом часто пользуются в лидарах аэрозольного рассеяния, когда есть резервы по уровню шума. В случае, когда угол поля зрения изменять нельзя из соображений обеспечения спектрального разрешения или по причине борьбы с фоном солнечного

* Сергей Михайлович Бобровников (bsm@iao.ru); Евгений Владимирович Горлов (gorlov_e@mail.ru); Виктор Иванович Жарков (zharkov@iao.ru).

излучения, как это бывает в лидарах комбинационного рассеяния, требуется поиск иных подходов, позволяющих уменьшить мертвую зону лидара при сохранении минимального поля зрения. Именно об этом и пойдет речь в настоящей публикации.

Интерес к проблеме управления формой геометрического фактора лидара возник практически сразу при работе с лидарами, когда стало понятно, что большой динамический диапазон изменения лидарных откликов представляет значительные трудности при фотодетектировании и оцифровке лидарных сигналов. Для снижения динамического диапазона и расширения области сбора сигнала по трассе зондирования предлагалось использовать различные приемы формирования геометрического фактора лидара за счет особенностей конструкции как приемной, так и передающей оптических систем. Так, например, в работе [7] для уменьшения мертвой зоны лидара было предложено использовать полевые диафрагмы специальной формы. В [8, 9] предлагается использовать метод деления зондирующего пучка на части для уменьшения динамического диапазона изменения лидарного отклика. Известны и другие способы управления геометрическим фактором лидара [10–12]. В упомянутых выше работах речь идет, как правило, о конструкциях приемопередатчиков, основанных на оптических схемах с непосредственной передачей оптических сигналов с помощью классических оптических элементов, призм, зеркал и т.п. В последнее время в лидаростроении все большее применение для передачи оптических сигналов находят моноволоконные оптические световоды [13–15].

Применение световодов существенно расширяет возможности компоновки оптической схемы и позволяет реализовать новые качества оптических систем лидара. Преимущества такого подхода особенно заметно проявляются при создании таких сложных лидарных систем, как СКР-лидары. Создание современного СКР-лидара немислимо без применения моноволоконных световодов. Это обстоятельство требует перехода на более высокий технологический уровень, необходимый как для создания самих световодов, так и для обеспечения условий их использования. При этом применение световодных технологий открывает новые возможности управления геометрическим фактором лидара, недоступные для классической компоновки. Одной из таких возможностей является формирование геометрического фактора за счет применения многоапертурной приемопередающей системы в СКР-лидаре.

СКР-лидар для круглосуточного мониторинга температуры и влажности атмосферы пограничного слоя

Проблема ухудшения экологической обстановки в современных мегаполисах с каждым годом становится все актуальнее, несмотря на предприни-

маемые меры по борьбе с выбросами в атмосферу. Одно из направлений снижения загрязненности атмосферы городов – это развитие методов борьбы со смогообразованием. В этой связи особую актуальность приобретает задача создания систем прогнозирования смогоопасной ситуации. Очевидно, что ключевым элементом такой системы являются средства контроля пространственного распределения метеопараметров в пограничном слое атмосферы, способные оперативно обнаруживать инверсные состояния вертикального хода температуры и влажности. Известно, что высота верхней границы пограничного слоя зависит от времени года, но, как правило, не превышает значения 3000 м [16–19]. Нижняя же граница пограничного слоя практически совпадает с подстилающей поверхностью. СКР-лидар как нельзя лучше подходит для контроля состояния пограничного слоя, поскольку позволяет проводить непрерывный мониторинг вертикального распределения температуры и влажности именно в этом диапазоне высот [20–28]. При проведении непрерывного мониторинга применение лидара становится экономически более выгодным по сравнению с использованием средств радиозондирования. Однако использование лидара в системе прогнозирования смогоопасной ситуации накладывает особые требования на его характеристики, такие как способность осуществлять непрерывные круглосуточные наблюдения; высокое пространственное разрешение; минимальное значение мертвой зоны лидара, желательно равной нулю, позволяющей «сшить» лидарные данные в нижней точке с данными контактных измерений.

В табл. 1 содержатся технические требования к параметрам лидара системы прогнозирования смогоопасной ситуации, определяемые структурой данных, необходимых при решении задачи диагностики состояния пограничного слоя атмосферы.

Таблица 1

Требования к параметрам лидара системы прогнозирования смогоопасной ситуации

Параметр	Значение
Диапазон высот, м	5÷3000
Пространственное разрешение, м	5
Погрешность измерения температуры, К	±1
Погрешность измерения отношения смеси водяного пара, %	5
Время измерения, мин	30–60
Излучение лазера	безопасное для глаз
Режим работы	круглосуточный

Как видно из таблицы, требования к разрешающей способности, особенно к границе мертвой зоны лидара (5 м), обусловленной необходимостью осуществления контактных измерений в нижней точке трассы, являются довольно жесткими. Для того чтобы определить облик лидара и оценить его габаритные и энергетические характеристики, были проведены расчеты лидарных сигналов с учетом

работы в условиях помехи фона солнечного излучения для стандартной модели атмосферы. В самом общем случае мощность лидарного отклика за один лазерный импульс можно записать в виде интеграла свертки

$$P(t, \lambda_x, \lambda_0) = \int_0^t S(t - \tau) \cdot H(\tau, \lambda_x, \lambda_0) d\tau, \quad (1)$$

где $S(t)$ – форма лазерного импульса; $H(t, \lambda_x, \lambda_0)$ или $H(r, \lambda_x, \lambda_0)$ – импульсная переходная характеристика системы «лидар–атмосфера»; r – расстояние от лидара до рассеивающего слоя (высота); t – временная координата сигнала, связанная с расстоянием r через скорость распространения светового импульса:

$$t = \frac{2r}{c}, \quad (2)$$

(c – скорость света).

Импульсную переходную функцию системы «лидар–атмосфера» можно записать как

$$H(r, \lambda_x, \lambda_0) = \frac{A}{r^2} K_0(\lambda_x) \eta(\lambda_x) T(\lambda_0, r) T(\lambda_x, r) \beta_\pi(\lambda_x, r) g(r), \quad (3)$$

где A – площадь приемной апертуры; $K_0(\lambda_x)$ – коэффициент пропускания приемного оптического тракта лидара; $\eta(\lambda_x)$ – квантовая эффективность фотодетектора; λ_x – длина волны принимаемого излучения; λ_0 – длина волны зондирующего излучения; $T(\lambda_0, r)$ и $T(\lambda_x, r)$ – спектральная прозрачность атмосферы для излучения с длиной волны λ_0 и λ_x соответственно; $\beta_\pi(\lambda_x, r)$ – коэффициент обратного рассеяния; $g(r)$ – геометрическая функция лидара.

Для лидара, использующего эффект спонтанного комбинационного рассеяния (СКР), коэффициент обратного рассеяния можно выразить через сечение СКР и концентрацию молекул [29]:

$$\beta_\pi(\lambda_x, r) = \frac{d\sigma(\lambda_x)}{d\Omega} C_n(r), \quad (4)$$

где $d\sigma(\lambda_x)/d\Omega$ – дифференциальное сечение СКР назад для взаимодействующих молекул; $C_n(r)$ – концентрация молекул в зависимости от дальности (высоты).

С помощью моделирования лидарного сигнала с использованием выражений (1)–(4) для стандартной модели атмосферы были определены параметры компонентов лидара (табл. 2), способные удовлетворить требованиям, содержащимся в табл. 1. В процессе моделирования в качестве исходных данных были взяты параметры коммерчески доступных компонентов лидара: лазер, блок спектральной селекции, система фоторегистрации. За-

тем для заданного пространственного разрешения и времени накопления рассчитывался объем накопления числа фотоотчетов, обеспечивающий статистическую погрешность измерения температуры ± 1 К на дистанции 3000 м для различных значений диаметров приемной апертуры. Минимальный диаметр приемной апертуры, обеспечивающий исходные характеристики лидара, представленные в табл. 1, составил 500 мм и был выбран в качестве основного параметра главного телескопа лидара (табл. 2).

Таблица 2

Параметры компонентов лидара для круглосуточного измерения температуры атмосферы

Параметр	Значение
<i>Приемопередатчик</i>	
Диаметр приемного зеркала, мм	500
Фокусное расстояние приемного зеркала, мм	1400
Диаметр передающей апертуры, мм	130
Диаметр световода, мкм	400
<i>Лазер*</i>	
Длина волны излучения, нм	354,7
Энергия в импульсе, мДж	200
Спектральная ширина линии излучения, см ⁻¹	1,5
Расходимость лазерного излучения, мрад	0,5
Частота повторения импульсов, Гц	20
Длительность импульса, нс	6–20
<i>Блок спектральной селекции</i>	
Коэффициент пропускания, %	20
Полуширина полосы пропускания, нм	1
<i>Система фоторегистрации</i>	
Квантовая эффективность, %	30

* Лазерный источник выбирался из числа коммерчески доступных лазеров с оптимальными весогабаритными и энергетическими характеристиками. Длина волны излучения определялась оптимальным соотношением сигнал/фон и требованиями безопасности для глаз.

Основная идея концепции СКР-лидара для дистанционного определения вертикального распределения температуры и влажности атмосферы в дневное время основана на применении приемной оптической системы со сверхузким полем зрения в сочетании с высоким спектральным разрешением систем спектральной селекции сигналов.

Как уже было отмечено выше, лидар для мониторинга смогоопасных ситуаций отличается от известных моделей лидаров [20–28] повышенным пространственным разрешением (3 м) и расширенным диапазоном дальности зондирования (5–3000 м). Максимальная дальность зондирования (3000 м) определяет минимально необходимый размер приемной апертуры лидара, обеспечивающей метрологические характеристики лидара на этой дальности. При этом даже для минимально допустимого размера апертуры и заданного угла поля зрения системы требования к протяженности мертвой зоны

(менее 5 м) становятся невыполнимы в силу фундаментальных законов геометрической оптики.

Противоречивость требований к параметрам лидара определяет необходимость специальной проработки конструкции приемопередатчика лидара с целью поиска технической реализации, обеспечивающей заданные характеристики. Эта задача может быть решена путем синтеза оптической схемы лидара на основе численного итерационного моделирования процесса измерения температуры и влажности атмосферы для стандартной модели атмосферы при вариациях параметров лидара.

Моделирование геометрической функции лидара и синтез оптической схемы приемопередатчика

Геометрическая функция лидара $g(r)$, входящая в выражение для расчета величины лидарного сигнала (3), является неотъемлемой характеристикой лидарной системы. Геометрическая функция лидара определяется соотношением параметров приемопередающей оптической системы и характеризует долю обратнорассеянного излучения, прошедшего через полевую диафрагму приемной оптической системы, к излучению, прошедшему через входной зрачок приемной апертуры, в зависимости от дальности до рассеивающего объема.

Рассмотрим основные схемы приемопередатчика лидара. На рис. 1 показаны коаксиальная схема лидара и схема лидара с разнесенными осями приемопередатчика.

На первый взгляд, коаксиальная схема лидара представляется наиболее перспективной с точки зрения обеспечения минимального значения величины мертвой зоны. Для моделирования геометрической функции коаксиальной схемы были использованы параметры элементов оптической схемы приемопередатчика, приведенные в табл. 2. Диаметр передающей апертуры при этом составлял 150 мм. На рис. 2 показаны результаты моделирования лидарного отклика от однородной атмосферы, нормированного на сигнал с предельной дальности (3000 м), с учетом геометрической функции для коаксиальной схемы лидара. Геометрическая функция рассчитывалась с помощью пакета программ трассировки лучей ZEMAX.

Как видно из рис. 2, б, при коаксиальной схеме лидара его геометрическая функция в ближней зоне уменьшается и обращается в нуль на дальности 20 м. Было выяснено, что причина появления мертвой зоны в коаксиальной схеме обусловлена эффектом затенения полевой диафрагмы приемника передающей апертурой. При этом размер передающей апертуры и диаметр полевой диафрагмы определяют глубину мертвой зоны. Поскольку передающая апертура реального лидара всегда имеет конечный размер, то очевидно, что коаксиальная схема не может обеспечить условия высокой эффективности зондирования на малых и сверхмалых дальностях.

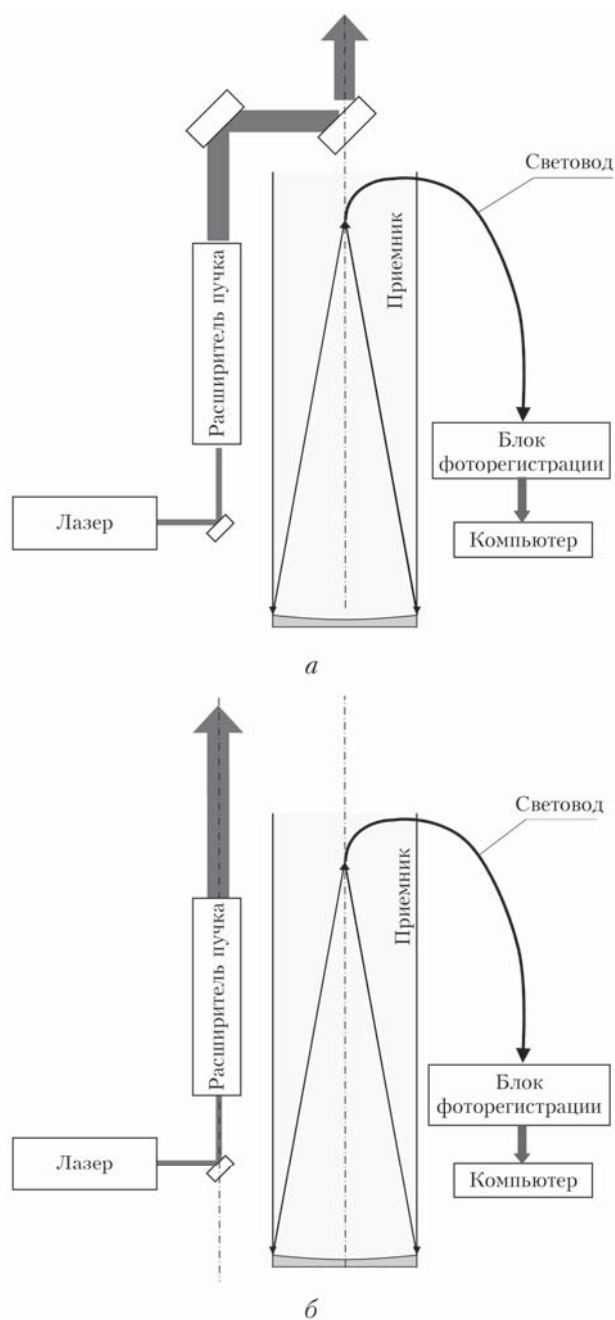
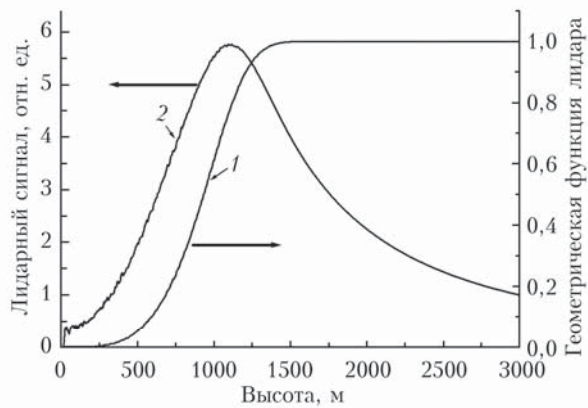
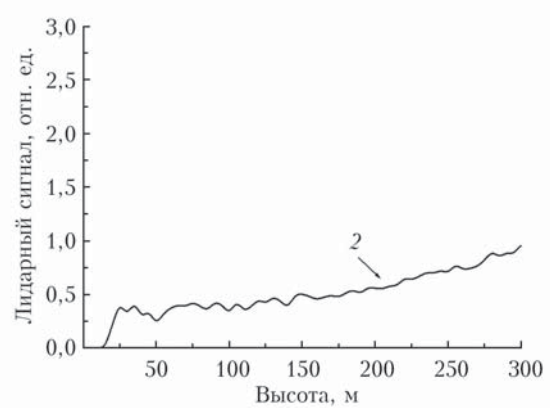


Рис. 1. Коаксиальная схема лидара (а) и лидар с разнесенными осями приемопередатчика (б)

Для схемы с разнесенными осями приемопередатчика эффекта затенения не будет, однако за счет наличия базы между оптическими осями приемной и передающей оптических систем изображение рассеивающего объема будет смещаться в плоскости изображения от периферии к центру при увеличении дальности до рассеивающего объема. Для выяснения возможностей использования схемы с разнесенными осями было проведено численное моделирование. При моделировании геометрической функции лидара с разнесенными осями приемопередатчика были использованы параметры элементов оптической схемы приемопередатчика, приведенные



a



б

Рис. 2. Геометрическая функция лидача (кривая 1) и лидарный сигнал (кривая 2) от однородной атмосферы, нормированный на сигнал с дальности 3000 м, с учетом геометрической функции при коаксиальной схеме лидача для параметров, приведенных в табл. 2: 0–3000 м (*a*), 0–300 м (*б*)

также в табл. 2. При этом минимальная база между осями приемника и передатчика составляла 330 мм. На рис. 3, *a* представлено распределение интенсивности в фокальной плоскости параболического зеркала при разнесенной схеме лидача для нескольких дальностей до рассеивающего объема. Оптическая ось зеркала наклонена к оптической оси передатчика на половину угла поля зрения для более эффективного сбора обратнорассеянного излучения. Рис. 3 поясняет механизм формирования геометрической функции лидача с разнесенными осями. При этом важно, что картина получена с помощью программы трассировки лучей ZEMAX, позволяющей учесть все факторы формирования изображения, включая aberrации оптических элементов приемопередатчика.

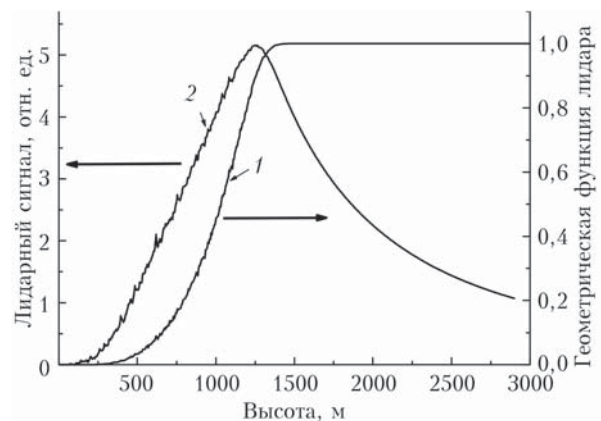
Размер полевой диафрагмы (или диаметр входного торца оптического волокна, выступающего в роли полевой диафрагмы), определяющей поле зрения приемной оптической системы, устанавливается из соображений использования минимального поля зрения (предельно допустимого уровня фона солнечного излучения). Как показывают расчеты, диаметр световода не может превышать значение 400 мкм для параметров лидача, приведенных в табл. 2. Результаты моделирования лидарного сигнала, нормированного на сигнал с дальности 3000 м, с учетом геометрической функции для разнесенной схемы лидача для параметров, приведенных в табл. 2, показаны на рис. 3, *б*. При этом, как видно из рис. 3, *б*, узкое поле зрения приводит к слишком малой эффективности приемной оптической системы для оптических сигналов из ближней зоны лидача (зона формирования геометрической функции лидача).

Частично проблему сокращения ближней зоны лидача можно решить установкой дополнительного световода в фокальную плоскость приемного объектива, как было показано в работе [30]. Это позволяет несколько расширить геометрическую функцию лидача (рис. 3). Однако данный подход, как

видно из результатов моделирования, представленных на рис. 4, *б*, не позволяет принимать сигналы с дальностей менее 100 м.



a



б

Рис. 3. Положение световода и пятен рассеяния в фокальной плоскости приемного телескопа (*a*); геометрическая функция лидача (кривая 1) и лидарный сигнал (кривая 2) от однородной атмосферы, нормированный на сигнал с дальности 3000 м, с учетом геометрической функции (*б*) для оптической схемы лидача с разнесенными осями для параметров, приведенных в табл. 2

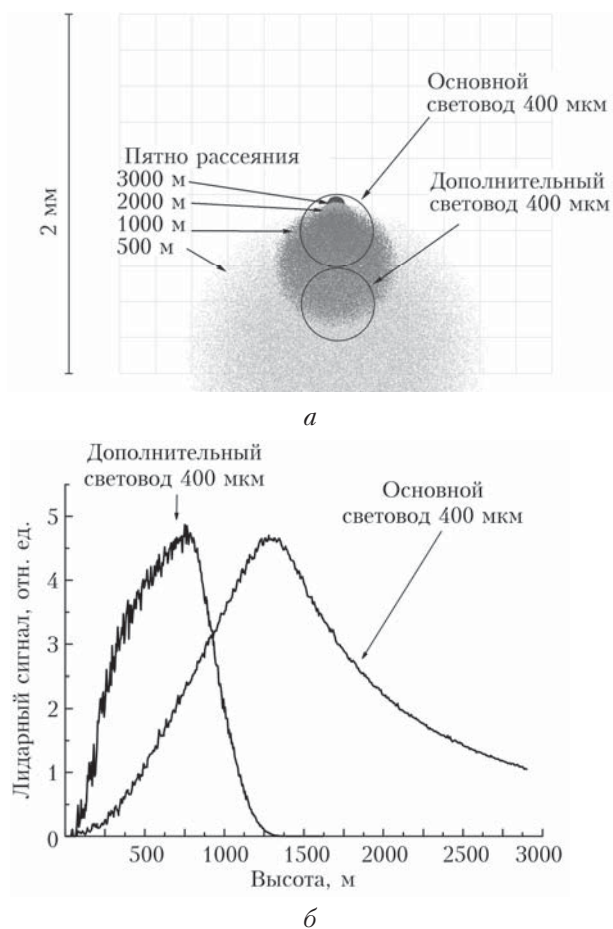


Рис. 4. Положение световодов и пятен рассеяния в фокальной плоскости приемного телескопа (а) и лидарный сигнал от однородной атмосферы, нормированный на сигнал с дальности 3000 м, с учетом геометрической функции (б) для оптической схемы лидара с разнесенными осями для параметров, приведенных в табл. 2, с дополнительным световодом

Известно, что решить проблему ближней и мертвой зон лидара может уменьшение базы между осями коллиматора и телескопа [11, 12]. Очевидно, что для этого придется использовать дополнительные телескопы меньшего диаметра. Это направление решения проблемы было взято за основу. В результате многочисленных итераций моделирования геометрических функций для различных конфигураций приемопередающей системы была окон-

чательно синтезирована оптическая схема приемопередатчика лидара с одной передающей и четырьмя приемными апертурами. Схема расположения апертур представлена на рис. 5.

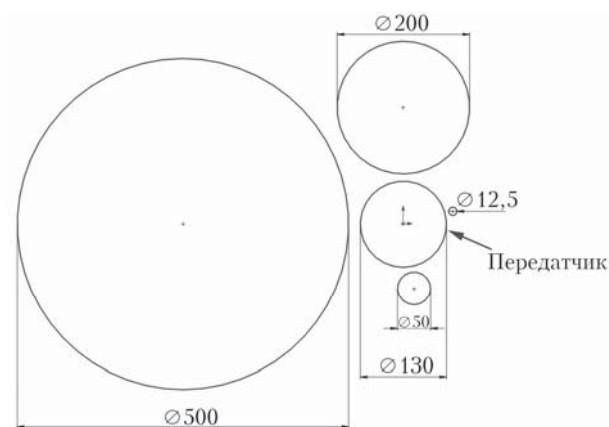


Рис. 5. Схема расположения приемопередатчика лидара. Размеры указаны в миллиметрах без учета размеров оправ и расположения элементов крепежа

Параметры элементов оптической схемы приемопередатчика и координаты их взаимного расположения представлены в табл. 3. Результаты моделирования лидарных откликов от однородной атмосферы, нормированных на сигнал с дальности 3000 м от приемника № 1, с учетом геометрической функции представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, многоэлементный приемопередатчик обеспечивает достаточно эффективный сбор оптического сигнала в диапазоне дальностей 5÷3000 м, что соответствует требованиям к лидарам для исследования протяженного слоя атмосферы. Кроме этого, использование набора апертур определенных диаметров (табл. 3) позволяет получить динамический диапазон изменения сигнала не более 10 в диапазоне дальностей 5÷3000 м.

Для проверки геометрической функции многоэлементного приемопередатчика лидара в дальнейшем будет проведен натурный эксперимент. Результаты сравнения геометрических функций лидара, полученные путем трассировки лучей и в натурном эксперименте, позволят проверить корректность методики компьютерного моделирования и оценить точность настройки многоапертурного приемопередатчика.

Таблица 3

Параметры многоэлементного приемопередатчика при разнесенной схеме лидара

Параметр	Приемник № 1	Приемник № 2	Приемник № 3	Приемник № 4
Диаметр приемной апертуры, мм	500	200	50	12,5
Фокусное расстояние приемника, мм	1400	600	150	40
Диаметр объектива передающего коллиматора, мм	130	130	130	130
База между осями, мм	330	180	95	80
Диаметр световода, мкм	400	300	200	200
Угол наклона между осями, град	0,012	0,02	0,05	0,08
Расстояние до плоскости световодов, мм	1400,769	600,153	151,6	39,6
Фокусировка приемника на дальность, м	3000	1000	200	200

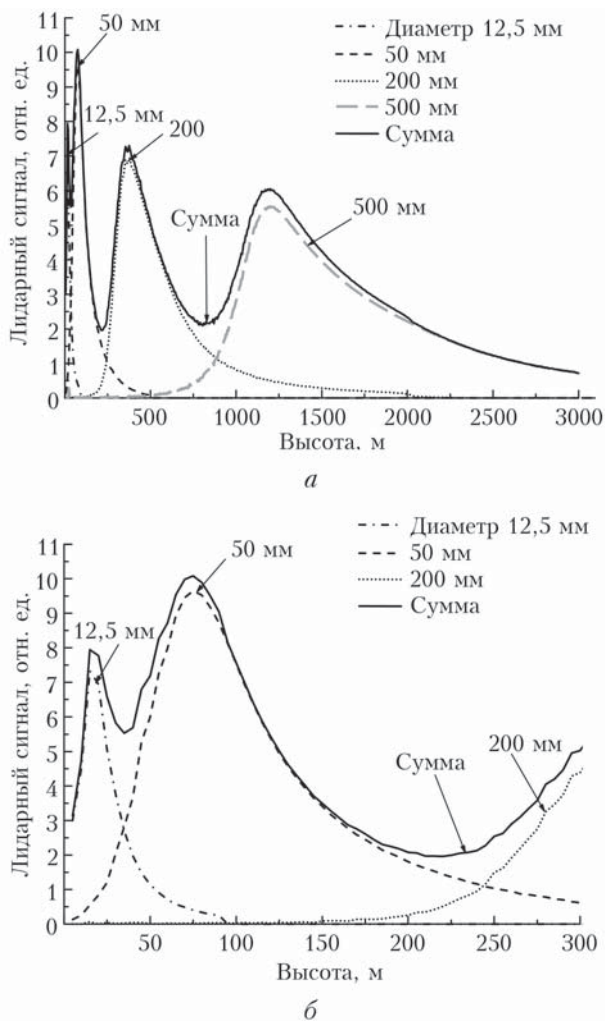


Рис. 6. Лидарные отклики от однородной атмосферы, нормированные на сигнал с дальности 3000 м от приемника № 1, с учетом геометрической функции для оптической схемы лидара с разнесенными осями для параметров многоапертурного приемопередатчика, приведенных в табл. 3: 0–3000 м (а), 0–300 м (б)

Заключение

Определены требования к параметрам лидара, предназначенного для решения задач исследования пограничного слоя атмосферы и прогнозирования опасности смогообразования.

Проведен синтез оптической схемы приемопередающей системы лидара с узким полем зрения и минимальной мертвой зоной. Представлены результаты компьютерного моделирования геометрических функций лидара, полученных методом трассировки лучей для нескольких вариантов оптической схемы приемной оптической системы.

Показано, что многоапертурный приемопередатчик позволяет обеспечить эффективный сбор сигналов обратного рассеяния в диапазоне дальностей 5–3000 м. Использование комбинации апертур различных диаметров позволяет уменьшить динамический диапазон лидарных откликов до 10 при изменении дальности от 5 до 3000 м.

Использование метода трассировки лучей при расчете геометрического фактора сложных лидарных систем позволяет получить результат с учетом реальных aberrаций оптических компонентов приемопередатчика и неточностей юстировки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.613.21.0077 – уникальный идентификатор RFMEFI61317X0077).

1. Agishev R.R., Adolfo C. Spatial filtering efficiency of monostatic biaxial lidar: analysis and applications // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 7516–7521.
2. Stelmazczyk K., Dell'Aglio M., Chudzynski S., Stawiec T., Wöste L. Analytical function for lidar geometrical compression form-factor calculations // J. Appl. Opt. 2005. V. 44, N 7. P. 1323–1331.
3. Wandinger U., Ansmann A. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar // Appl. Opt. 2002. V. 41, N 3. P. 511–514.
4. Hu S., Wang X., Wu Y., Li C., Hu H. Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals // Opt. Lett. 2005. V. 30 (14). P. 1879–1881.
5. Банах В.А., Разенков И.А., Смалыхо И.Н. Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния. I. Компьютерное моделирование // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28. № 1. С. 5–11.
6. Кауль Б.В. Антенный комплекс для лазерного зондирования верхних слоев атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 4. С. 431–438.
7. Абрамочкин А.И., Тихомиров А.А. Оптимизация приемной системы лидара. 2. Пространственные фильтры. // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 4. С. 345–356.
8. Балин Ю.С., Самохвалов И.В. Некоторые пути уменьшения динамического диапазона лидарных сигналов // Аппаратура и методики дистанционного зондирования параметров атмосферы. Новосибирск: Наука, 1979. С. 43–47.
9. А. с. 496524 СССР, Способ оптического зондирования атмосферы / Балин Ю.С., Самохвалов И.В., Шамонов В.С. Опубл. в БИ. 1975. Бюл. № 47.
10. Тихомиров А.А. Анализ методов и технических средств сжатия динамического диапазона лидарных сигналов // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 2. С. 208–219.
11. Лидарный комплекс для контроля оптического состояния атмосферы: Пат. 116652. Россия, Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В.; Ин-т оптики атмосф. им. В.Е. Зуева СО РАН. Заявл. 17.05.2011; Опубл. 27.05.2012.
12. Balin Yu.S., Bairashin G.S., Kokhanenko G.P., Klemasheva M.G., Penner I.E., Samoilova S.V. LOSA-M2 aerosol Raman lidar // Quantum Electron. 2011. V. 41, N 10. P. 945–949.
13. Balin I., Serikov I., Bobrovnikov S., Simeonov V., Calpini B., Arshinov Y., van den Bergh H. Simultaneous measurement of atmospheric temperature, humidity, and aerosol extinction and backscatter coefficients by a combined vibrational–pure-rotational Raman lidar // Appl. Phys. B. 2004. № 79. P. 775–782.
14. Radlach M., Behrendt A., Wulfmeyer V. Scanning rotational Raman lidar at 355 nm for the measurement of tropospheric temperature fields // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 159–169.
15. Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Serikov I., Ansmann A., Wandinger U., Althausen D., Mattis I., Müller D.

- Daytime operation of a pure rotational Raman lidar by use of a Fabry–Perot interferometer // *Appl. Opt.* 2005. V. 44, N 17. P. 3593–3603.
16. Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Терпугова С.А., Банах В.А., Смалихо И.Н., Фалиц А.В., Рассказчикова Т.М., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б. Структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по данным аэрозольного и доплеровского лидаров в период прохождения атмосферных фронтов // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 679–688; *Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Penner I.E., Samoilo-va S.V., Terpugova S.A., Banakh V.A., Smalikh I.N., Falits A.V., Rasskazchikova T.M., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B.* Structure of aerosol fields of the atmospheric boundary layer according to aerosol and Doppler lidar data during passage of atmospheric fronts // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 18–32.
 17. *McGrath-Spangler E.L., Molod A.* Comparison of GEOS-5 AGCM planetary boundary layer depths computed with various definitions // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, P. 6717–6727.
 18. *McGrath-Spangler E.L., Denning A.S.* Global seasonal variations of midday planetary boundary layer depth from CALIPSO space-borne LIDAR // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118. P. 1226–1233.
 19. *Seidel D.J., Ao C.O., Li K.* Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, N D16. P. D16113. DOI: 10.1029/2009JD013680
 20. *Cooney J., Pina M.* Laser radar measurements of atmospheric temperature profiles by use of Raman rotational backscatter // *Appl. Opt.* 1976. V. 15. P. 602–603.
 21. *Gill R., Geller K., Farina J., Cooney J.* Measurement of atmospheric temperature profiles using Raman lidar // *J. Appl. Meteorol.* 1979. V. 18. P. 225–227.
 22. *Matvienko G.G., Balin Yu.S., Bobrovnikov S.M., Romanovskii O.A., Kokhanenko G.P., Samoilo-va S.V., Penner I.E., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Sadov-nikov S.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V., Baz-henov O.E., Burlakov V.D., Dolgii S.I., Makeev A.P., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V.* Siberian Lidar Station: instrument and results // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. CID: 1003 59. [10035–227]. DOI: 10.1117/12.2254787.
 23. *Cooney J.A.* Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter // *J. Appl. Meteorol.* 1972. V. 11, N 1. P. 108–112.
 24. *Butcher R.J., Willetts D.V., Jones W.J.* On the use of Fabry-Perot etalon for the determination of rotational constants of simple molecules – the pure rotational Raman spectra of oxygen and nitrogen // *Proc. Roy. Soc. Lon. A.* 1971. V. 324. P. 231–245.
 25. *Reichardt J., Wandinger U., Klein V., Mattis I., Hilber B., Begbie R.* RAMSES: German Meteorological Service autonomous Raman lidar for water vapor, temperature, aerosol, and cloud measurements // *Appl. Opt.* 2012. V. 51. P. 8111–8131.
 26. *Goldsmith J., Blair F.H., Bisson S.E., Turner D.D.* Turn-key Raman lidar for profiling atmospheric water vapor, clouds, and aerosols // *Appl. Opt.* 1998. V. 37, P. 4979–4990.
 27. *Sherlock V., Hauchecorne A., Lenoble J.* Methodology for the independent calibration of Raman backscatter water-vapor lidar systems // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. P. 5816–5837.
 28. *Whiteman D.N., Melfi S.H., Ferrare R.A.* Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. P. 3068–3082.
 29. *Лазерный контроль атмосферы* / под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
 30. *Dinoyev T., Simeonov V., Arshinov Y., Bobrov-nikov S., Ristori P., Calpini B., Parlange M., van den Bergh H.* Raman lidar for meteorological observations, RALMO – Part 1: Instrument description // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 1329–1346.

S.M. Bobrovnikov, E.V. Gorlov, V.I. Zharkov. **A multi-aperture transceiver system of a lidar with narrow field of view and minimal dead zone.**

The requirements to the transceiver system of a Raman-lidar intended for studying the atmospheric boundary layer and predicting the danger of smog formation are determined. Synthesis of the optical layout of a lidar transceiver system with narrow field of view and minimal dead zone is carried out. The results of computer simulation of the lidar overlap functions obtained by the ray tracing for several variants of the optical layout of the receiving optical system are presented. It is shown that when using a multi-element transceiver based on a combination of four receiving apertures of different diameters, a lidar sensing range from 5 to 3000 m can be obtained in a dynamic range of the lidar response of no more than 10.