

УДК 353.361:551.6:621.371

# Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния.

## II. Конструкция и эксперимент

В.А. Банах, И.А. Разенков\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 25.07.2014 г.

Дано описание аэрозольного лидара для исследования эффекта усиления обратного атмосферного рассеяния с двумя приемными каналами. Один из каналов совмещен с передающим и реализует моностатическую схему приема, во втором (бистатическом) канале рассеянное излучение принимается под углом к оси зондирующего пучка. Отношение мощностей эхосигналов, регистрируемых в этих каналах, определяет величину эффекта усиления обратного атмосферного рассеяния. Результаты атмосферных экспериментов с лидаром показывают, что, как правило, мощность эхосигнала в моностатическом приемном канале превышает мощность сигнала в бистатическом.

*Ключевые слова:* усиление обратного рассеяния, турбулентная атмосфера, аэрозольный лидар с двумя приемными каналами; backscatter amplification, turbulent atmosphere, aerosol lidar with two receiving channels.

### Введение

В [1] выполнено компьютерное моделирование работы аэрозольного лидара с двумя приемными каналами и определены требования к параметрам лидара и геометрии экспериментов по исследованию эффекта усиления мощности сигнала обратного атмосферного рассеяния. Показано, что коэффициент усиления мощности локационного сигнала (УМЛС), т.е. отношение мощности обратного рассеянного в атмосфере излучения при моностатической схеме приема к мощности эхосигнала при бистатическом приеме, растет с уменьшением размеров приемной апертуры. Так как прием рассеянного излучения в бистатическом канале происходит под некоторым углом к оси зондирующего пучка и, соответственно, к моностатическому каналу, то при проведении экспериментов по исследованию УМЛС важным моментом является обеспечение идентичности обоих каналов по принимаемой мощности в отсутствие эффекта усиления обратного рассеяния. Это налагает определенные ограничения на дальность зондирования.

В настоящей статье дано описание макета аэрозольного лидара с двумя приемными каналами и представлены результаты его апробации в атмосферных экспериментах.

При разработке макета двухканального лидара предполагалось, что для изучения эффекта УМЛС потребуются непрерывные измерения в автономном

режиме в течение длительного времени. Это вызывает необходимость обеспечения стабильности в работе лидара при изменении внешних условий. В первую очередь важна термомеханическая стабильность конструкции лидара, когда ожидаемые перепады температуры не приводят к существенным деформациям оптической скамьи и к разъюстировке приемопередатчика. Такого рода системы известны [2]. В них расширение лазерного пучка осуществляется через приемный телескоп, который, таким образом, становится общим для передатчика и приемника. В этом случае взаимное рассогласование оптических осей передатчика и приемника автоматически понижается во столько раз, во сколько раз увеличивает телескоп.

В системах с одним телескопом для передачи и приема излучения не используются лазеры с мощными импульсами, поскольку рассеянное на оптике выходное излучение может повредить или существенно расстроить работу фотодетекторов. Поэтому, как правило, применяют лазеры с диодной накачкой и с высокой частотой повторения импульсов, имеющие к тому же повышенный (вплоть до нескольких лет) ресурс непрерывной работы. Энергия в импульсе диодных лазеров должна быть существенно меньше 1 мДж, а частота следования импульсов выше 1 кГц, так что за счет высокой частоты повторения достигается достаточно высокий средний уровень выходной мощности излучения при малых габаритах лазера. Такого рода системы часто называют «микрои импульсными лидарами».

Отличительной чертой лидаров с расширением пучка через приемный телескоп является то, что работают они в режиме счета фотонов. При этом резко

\* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru).

увеличивается динамический диапазон системы регистрации, а точность регистрации сигнала определяется временем накопления, которое может задаваться от долей секунды до минут. Это качество для нашей системы тем более важно, что мы вынуждены, как это следует из [1], намеренно уменьшать приемную апертуру, чтобы система была в состоянии регистрировать повышение сигнала за счет УМЛС.

## 1. Конструкция макета

Макет состоит из двух основных частей – 40-сантиметрового телескопа и жесткого оптического стола толщиной 75 мм, которые закреплены стандартными креплениями на общем основании в виде оптической скамьи ОСК-2. Основные параметры макета лидара приведены ниже.

Передатчик	
Длина волны	532 нм
Длительность импульса	10 нс
Частота повторения импульсов	5 кГц
Средняя мощность	200 мВт
Размер пучка	30 мм
Расходимость пучка	60 мкрад
Продолжительность работы	10000 ч
Приемник	
Афокальный телескоп	400 мм
Увеличение телескопа	10 <sup>x</sup>
Приемные апертуры	40 мм
Разнесение каналов	250 мм
Поле зрения	420 мкрад
Пространственное разрешение	2 м
Время накопления	10 мин

При создании макета лидара основополагающей являлась идея использования одного афокального телескопа (зеркальный коллиматор), на котором передающий и основной (осевой) приемный каналы расположены на одном краю, а второй дополнительный (внеосевой) приемный канал располагается на противоположной стороне симметрично относительно оптической оси телескопа. Оптическая схема приемопередатчика приведена на рис. 1.

На оптическом столе 1 закреплен «зеленый» импульсный твердотельный лазер на гранате 2, пучок которого коллимируется длиннофокусной положительной линзой 4. Для настройки и уменьшения габаритов оптической схемы использованы плоские зеркала 3, 5, 6 и 15. Роль антенного переключателя в системе выполняет светоделительная пластина 7 (50/50). Половина мощности излучения от пластины 7 направляется на афокальный зеркальный телескоп Мерсена 8–9 (парабола–парабола). Вторая половина мощности проходит сквозь пластину 7 и направляется в оптическую ловушку (на схеме не показана). Это вынужденные потери на обеспечение термомеханической стабильности конструкции. Телескоп, состоящий из зеркал 8 и 9, осуществляет десятикратное расширение лазерного пучка, который затем через верхнее отверстие двойной апертурной диафрагмы 10 выходит в атмосферу.

Приемная часть макета работает следующим образом. Рассеянное в атмосфере излучение поступает на телескоп через два отверстия диафрагмы 10. Через верхнее отверстие (на самом деле оно расположено справа, так как на рис. 1 показан вид сверху) приходят фотоны, рассеянные строго в обратном направлении вдоль оси пучка (канал 1). Через нижнее (левое) отверстие поступают фотоны, рассеянные под небольшим углом (~1') к оси зондирующего пучка (канал 2). Из оценки бюджета фотонов для времени накопления ≤ 10 мин и погрешности регистрации ≤ 5% следует, что для достижения дальности зондирования примерно 2 км размеры приемной апертуры и соответственно пучка на выходе должны быть не менее 30 мм. Телескоп необходимо сфокусировать на заданную дистанцию, тогда оптические оси пучка и второго приемного канала будут иметь одинаковые углы наклона относительно оси телескопа.

После телескопа пучки проходят через светоделительную пластину 7 и поступают на фокусирующую линзу 12, находящуюся в приемном ящике 21. На пластине 7 опять теряется 50% мощности сигнала. Перед линзой 12 располагается диафрагма 11

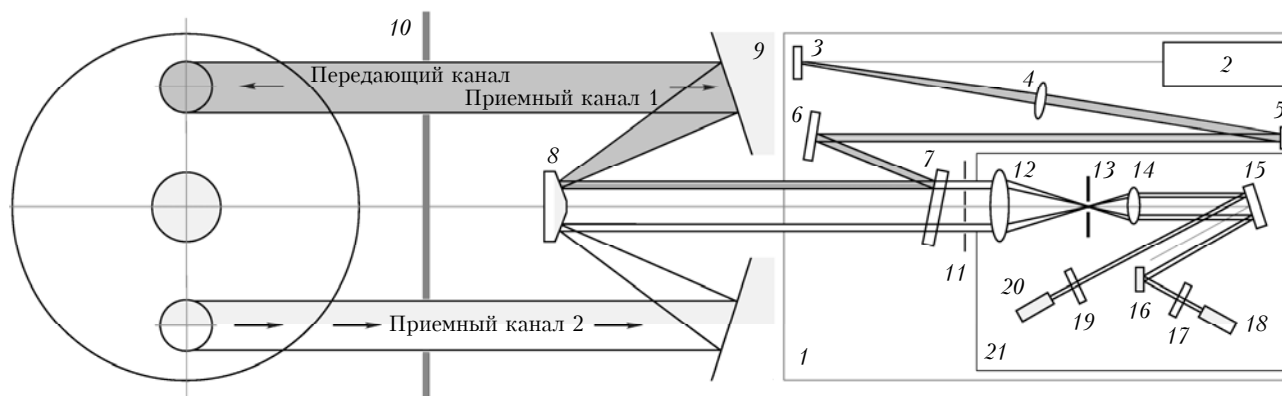


Рис. 1. Оптическая схема приемопередатчика лидарного макета. Вид сверху. Слева – расположение апертур на главном зеркале телескопа

с двумя отверстиями, диаметр которых ненамного превышает размер пучков. Диффрагма 11 предназначена для снижения уровня паразитной засветки от оптики, расположенной вне приемного ящика. В фокусе линзы 12 стоит диффрагма 13, обеспечивающая абсолютное совпадение по величине полей зрения приемников в обоих каналах. Отношение диаметра отверстия 13 (0,84 мм) к фокальному расстоянию линзы 12 (200 мм), умноженному на кратность увеличения телескопа ( $10\times$ ), определяет полный угол поля зрения приемников (420 мкрад). Далее оба пучка коллимируются линзой 14, поворачиваются плоским зеркалом 15, разводятся в разные стороны плоским зеркалом 16, проходят через интерференционные светофильтры 17 и 19 и поступают на фотоэлектронные умножители 18 и 20 (фирма Hamamatsu) с размером фотокатода 8 мм.

Оптическая схема лидара, параметры приемопередатчика, геометрия зондирования подбирались и оптимизировались в течение длительного времени. Эксперимент мы начинали в августе 2013 г., а результаты с определенной степенью достоверности получили лишь в октябре.

## 2. Эксперимент

Эксперимент проводился на полигоне Института оптики атмосферы на окраине г. Томска с августа по ноябрь 2013 г. Примерный профиль местности и схема эксперимента показаны на рис. 2. Перепад высот не превышал 100 м. Работа строилась следующим образом. Были организованы две трассы, на одной из них пучок направлялся в точку А на территории полигона, на другой — точку Б за ее пределами. Точка А была на удалении 500 м от лидара, а Б — на 2200 м. На трассе 2200 м фокусировка зондирующего пучка осуществлялась на расстоянии  $x_0 = 1$  км.

Мы были вынуждены направлять зондирующий пучок на лес, чтобы снизить уровень фоновой засветки. Дело в том, что система работала в режиме счета фотонов, а измерения производились непрерывно днем и ночью. Даже при настройке на лес уровень фона днем мог превышать уровень сигнала.

В реальности вместе с полезными осевым  $P_1$  и внеосевым  $P_2$  сигналами мы, во-первых, регистрируем некий дополнительный сигнал в виде постоянной фоновой засветки, а во-вторых, полезный сигнал

может искажаться за счет нелинейности и ослепления фотодетектора выходным излучением. Когда лазерный импульс посылается в атмосферу, на фотоприемник, предназначенный для приема слабого сигнала обратного рассеяния в режиме счета единичных фотонов, одновременно поступает до нескольких десятков тысяч фотонов прямой засветки за счет рассеяния выходного излучения на оптических элементах макета. После такого «шока» детектору требуется время для восстановления. Иными словами, мы никогда не регистрируем мощности полезных осевого  $P_1(x)$  и внеосевого  $P_2(x)$  сигналов в чистом виде, а имеем для мощностей принимаемых сигналов соотношения

$$\tilde{P}_1(x) = P_1(x) + P_{BG_1} + P_{AP_1}(x), \quad (1)$$

$$\tilde{P}_2(x) = P_2(x) + P_{BG_2} + P_{AP_2}(x), \quad (2)$$

где  $P_{BG_1}$  и  $P_{BG_2}$  — мощности постоянной фоновой засветки в приемных каналах,  $P_{AP_1}(x)$  и  $P_{AP_2}(x)$  — мощности сигналов последействия приемников. Если подходить строго, в выражениях (1) и (2) необходимо учитывать нелинейность детекторов, т.е. сумма в правых частях (1) и (2) должна умножаться на некоторую функцию, которая зависит от абсолютного значения сигнала. Однако, как показывают оценки, из-за малости амплитуды сигнала относительная погрешность регистрации мощности сигнала за счет нелинейности не превышает 1%. Статистическая погрешность регистрации в несколько раз больше, поэтому нелинейные искажения в (1) и (2) не учитываются.

Мощности сигналов  $P_{BG_1}$  и  $P_{BG_2}$  фоновой засветки в приемных каналах определялись каждый раз при регистрации профиля сигнала по его уровню в дальней зоне на дистанции 6 км, где сигналы  $P_1(x)$  и  $P_2(x)$  и сигналы последействия  $P_{AP_1}(x)$  и  $P_{AP_2}(x)$  можно полагать равными нулю. Мощности сигналов  $P_{AP_1}(x)$  и  $P_{AP_2}(x)$  регистрировались при закрытом черным экраном выходе в атмосферу, что обеспечивало равенство нулю сигналов  $P_1(x)$  и  $P_2(x)$  и  $P_{BG_1}$  и  $P_{BG_2}$ . Полученные таким образом значения мощностей сигналов фоновой засветки и последействия позволяют найти мощности полезных сигналов  $P_1(x)$  и  $P_2(x)$ :

$$P_1(x) = \tilde{P}_1(x) - P_{BG_1} - P_{AP_1}(x), \quad (3)$$

$$P_2(x) = \tilde{P}_2(x) - P_{BG_2} - P_{AP_2}(x). \quad (4)$$

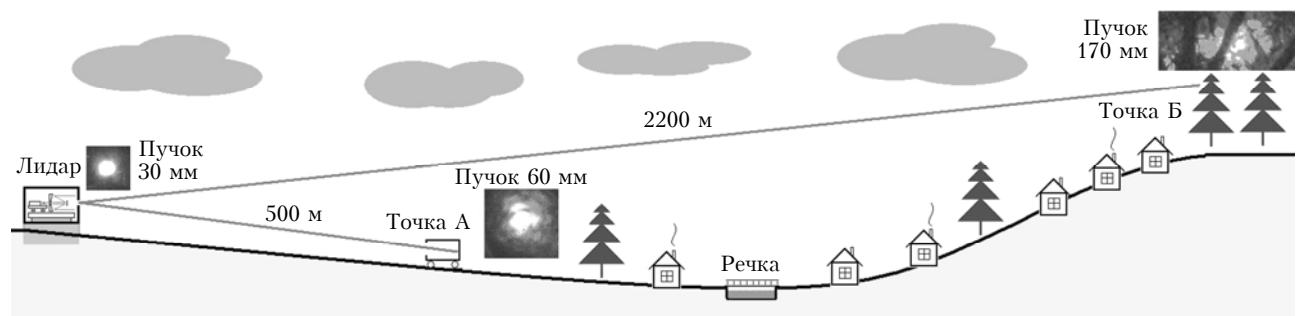


Рис. 2. Схема эксперимента, фотографии лазерного пучка

На рис. 3 показаны реальные сигналы, регистрируемые в приемных каналах. Сигналы получены при ясной погоде 21 октября 2013 г. в 10:50 (здесь и далее время местное).

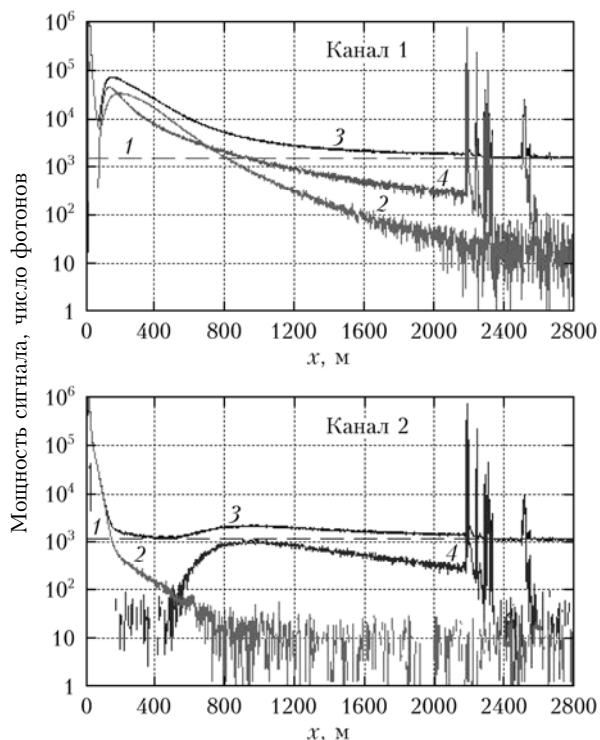


Рис. 3. Профили сигналов в канале 1 и в канале 2. Фоновая засветка (штриховые линии 1), сигналы последействия (кривые 2), регистрируемый сигнал (кривые 3) и скорректированный «полезный» сигнал (кривые 4)

Обращает на себя внимание большой динамический диапазон изменения мощности сигналов, достигающий  $10^6$ . Фон имеет постоянное значение. Сигналы последействия  $P_{AP_1}(x)$  и  $P_{AP_2}(x)$  (кривые 2) существенно различаются. Это связано с тем, что детектор приемного канала 1 в момент выстрела засвечивается гораздо сильнее детектора канала 2, так как находится строго напротив той области на светоделительной пластине 7 (см. рис. 1), откуда лазерный луч направляется на телескоп. На рис. 3 профили полезных сигналов  $P_1(x)$  и  $P_2(x)$  показаны кривыми 4. На дистанции 2200 м лазерный луч упирается в лес, где отражается от деревьев и дает несколько коротких пиков большой амплитуды.

Видно, что уровень фона был высоким и превышал полезный сигнал. Импульс последействия в канале 1 тянется почти до 3 км, в канале 2 — до 1 км. Таким образом, во всем возможном диапазоне трасс измерения УМЛС  $x > 700$  м при углах поля зрения приемников 420 мкрад [1] необходимо учитывать сигналы последействия.

В «идеальном» лидаре в отсутствие усиления обратного рассеяния регистрируемые мощности эхосигналов в дальней зоне в обоих каналах должны быть одинаковы. Однако из-за разницы в потерях на оптических элементах, в чувствительности фотоде-

текторов в разных приемных каналах, в неточности юстировки осей приемопередатчика эхосигналы могут незначительно отличаться друг от друга. Поэтому важно получить профиль отношения мощностей сигналов  $R(x) = P_1(x)/P_2(x)$  вдоль трассы зондирования в условиях слабой оптической турбулентности в атмосфере, когда усиление мощности в пределах точности измерений невозможно зарегистрировать. То есть важно получить некоторый калибровочный профиль отношения  $R_0(x) = R(x)$  в отсутствие УМЛС, который бы учитывал неидентичность приемных каналов. И затем, пронормировав измеряемые отношения  $R(x)$  на  $R_0(x)$ , выделить изменения отношения  $R(x)$  за счет УМЛС. Такая нормировка, кроме того, обеспечивает учет геометрического фактора, что позволяет расширить диапазон трасс измерений УМЛС на область меньших протяженностей, когда еще нет идентичности приемных каналов из-за неполного перехвата изображения рассеивающего объема приемником внеосевого канала [1].

Рис. 4 иллюстрирует изменение отношения мощностей сигналов в отсутствие УМЛС ( $R_0(x) = P_1(x)/P_2(x)$ ) и нормированного на него отношения мощностей сигналов в приемных каналах ( $R'(x) = R(x)/R_0(x)$ ) вдоль трассы зондирования. Калибровочное отношение  $R_0(x)$  показано на рис. 4, а, а отношения  $R'(x)$  представлены на рис. 4, б и рис. 4, в. Данные на рис. 4, б были получены при наличии усиления, поэтому отношение  $R'(x)$  монотонно растет, достигая значений, превышающих 1,4. Данные на рис. 4, в были получены спустя 3 ч 20 мин. В это время усиление не наблюдалось и, следовательно, отношение  $R'(x)$  в пределах погрешности было равно 1. На расстоянии 1 км отношение  $R'(x)$  приблизительно равно 1 и отклонения не превышают 5%. На расстоянии 1,5 км отклонения равны примерно 5% и достигают 10–15% в конце трассы 2,2 км. С целью уменьшения разброса исходные значения отношений  $R_0(x)$  и  $R'(x)$  усреднялись по 25 отсчетам в интервале 50 м. Серым цветом показаны исходные профили  $R_0$  и  $R'$ , усредненным профилям соответствуют кривые темного цвета. Из рис. 4 видно, что в эксперименте сигналы  $P_1$  и  $P_2$  выходят на постоянный уровень на значительно больших расстояниях, чем это следует из расчетов [1]. Так что нормировочное отношение  $R_0$  принимает значения, близкие к единице, лишь на трассах протяженностью более 1,5 км. На меньших расстояниях геометрический фактор все еще сказывается.

На рис. 5 приведены сигналы, полученные в условиях существенно неоднородной концентрации аэрозоля в атмосфере вдоль трассы зондирования. Оптическая турбулентность была слабой, и эффект усиления не фиксировался. Профиль  $R_0(x)$  рассчитывался по данным рис. 5, а и использовался для нормировки данных, полученных почти на 4 ч раньше, когда эффекта усиления мощности тоже не было, но в атмосфере на удалении 1,5 км располагалась протяженная умеренно плотная аэрозольная неоднородность. Из рис. 5, в видно, что мощность сигналов на расстоянии 1,5 км возрастает примерно в 4 раза. Соответствующий профиль отношения  $R'(x)$

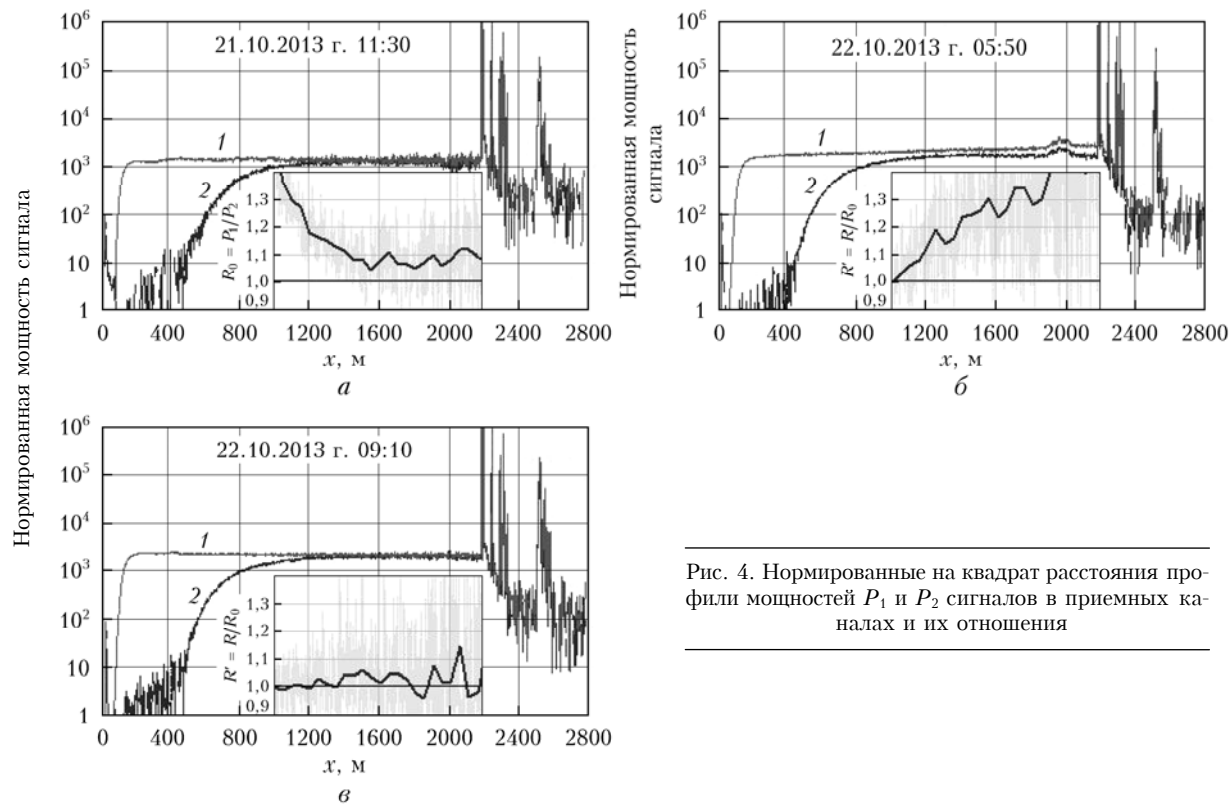


Рис. 4. Нормированные на квадрат расстояния профили мощностей  $P_1$  и  $P_2$  сигналов в приемных каналах и их отношения

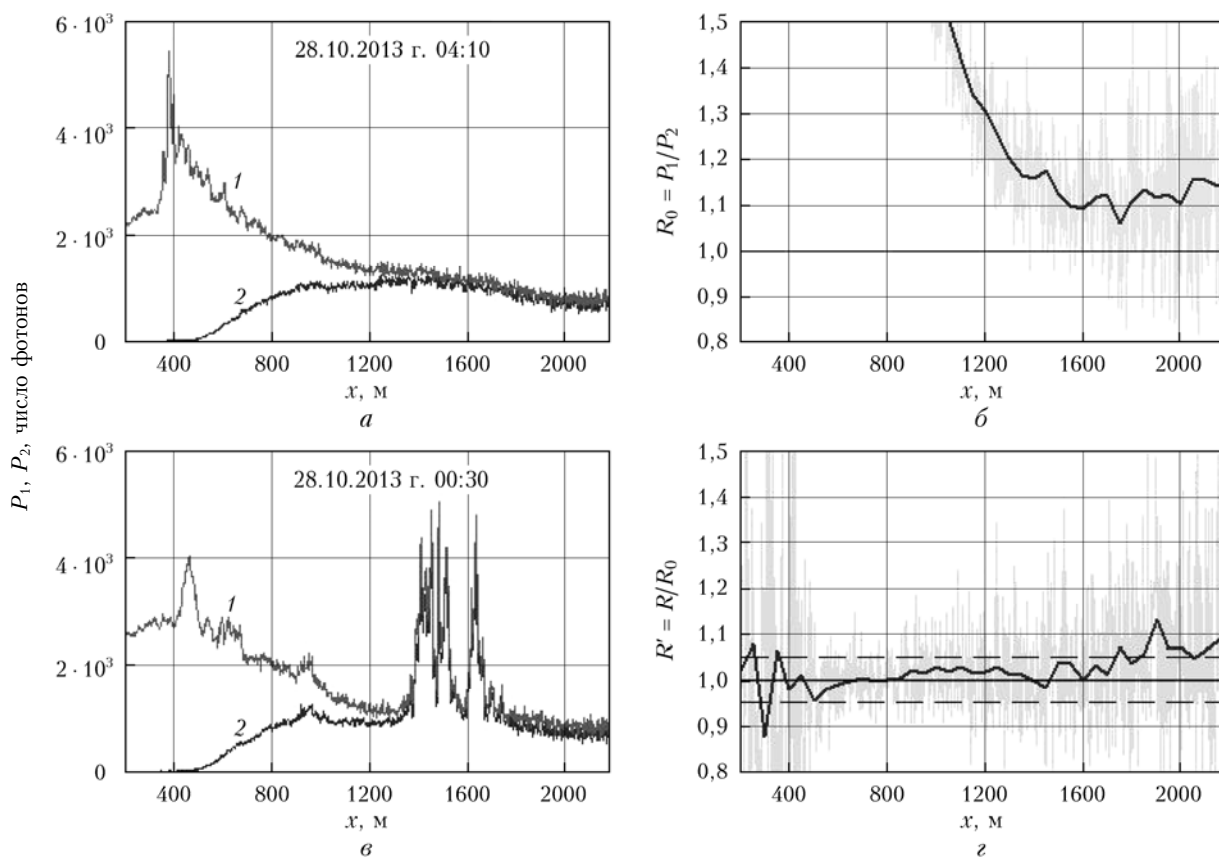


Рис. 5. Профили мощностей сигналов (*а*, *в*) и отношений  $R_0(x)$  (*б*) и  $R'(x)$  (*г*) при наличии неоднородностей концентрации аэрозоля в атмосфере вдоль трассы зондирования в отсутствие усиления

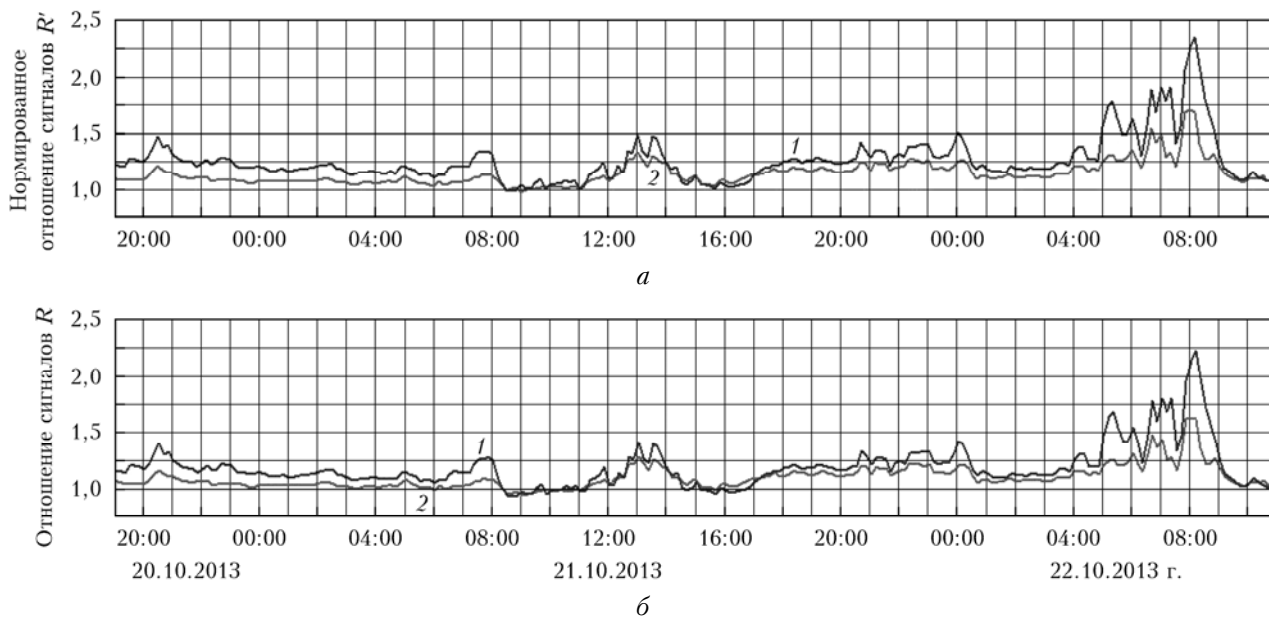


Рис. 6. Отношение  $R$  и  $R'$  на расстояниях  $x = 1,5$  и  $2$  км:  $1 - x = 2$ ,  $2 - 1,5$  км

на рис. 5,  $z$  в диапазоне от 500 до 1800 м был равен 1 в пределах  $\pm 5\%$  (штриховые линии), и лишь в конце трассы 2,2 км отклонение достигало 10%.

Из рис. 3–5 следует, что в максимуме сигнал равен примерно 1000 фотонов на 3 млн произведенных за 10 мин выстрелов. Известно, что сигнал подчиняется статистике Пуассона [1] и, следовательно, относительная погрешность счета фотонов с учетом усреднения составляет  $1/\sqrt{25 \cdot 1000} < 1\%$ . Соответственно, если в конце трассы мы имеем 100 фотонов, то погрешность составит  $1/\sqrt{25 \cdot 100} = 2\%$ . Это в 5 раз меньше, чем среднеквадратическое отклонение значений регистрируемой мощности на рис. 3–5, т.е. другие факторы оказывают на погрешность большее влияние, чем статистика фотоотсчетов. Можно предположить, что это вызвано нестационарностью атмосферных процессов за время накопления сигнала.

Установка на полигоне работала непрерывно. Вначале зондировали по точке А, затем более 2 мес по точке Б. На рис. 6, *a* в качестве примера представлены результаты измерения отношения  $R'(x)$  для трасс  $x = 1,5$  и  $2$  км, полученные в течение 40 ч непрерывных наблюдений 20–22 октября 2013 г. Калибровочное отношение  $R_0(x)$  определялось в 10:00 21 октября 2013 г., когда усиление отсутствовало. Видно, что практически всегда регистрируемая мощность в осевом канале превышает мощность сигнала обратного рассеяния во внеосевом приемном канале. Наибольшие значения коэффициента усиления, достигавшие 2,3, имели место утром 22 октября 2013 г. с 4:00 до 9:00.

Для сравнения на рис. 6, *б* представлен профиль отношения сигналов  $R(x)$  на тех же расстояниях. Видно, что профили  $R(x)$  и  $R'(x)$  повторяют друг друга и лишь незначительно различаются по абсолютной величине.

## Заключение

Предложена и реализована конструкция макета двухканального аэрозольного лидара, предназначенного для изучения усиления обратного атмосферного рассеяния. Конструкция макета основана на использовании одного и того же телескопа и для передачи узкого светового пучка в атмосферу, и для одновременной регистрации эхосигналов на две независимые приемные апертуры малого размера. Одна из приемных апертур одновременно является и передающей, что обеспечивает в макете реализацию и моностатической, и бистатической схем зондирования.

Созданный макет лидара обладает повышенной термомеханической стабильностью и способен автоматически производить длительные измерения. При испытаниях система круглосуточно работала по горизонтальной трассе. Регистрация сигналов осуществлялась в режиме счета фотонов, время накопления (усреднения) составляло 10 мин. Как правило, сигнал в моностатическом канале был выше, чем в бистатическом.

Авторы выражают глубокую признательность А.С. Гурвичу за инициирование работ в данном направлении, внимание и поддержку, а также благодарность А.И. Надееву за помощь в создании аппаратуры и консультации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 12-05-00332.

1. Банах В.А., Разенков И.А., Смалихо И.Н. Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния. I. Компьютерное моделирование // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 5–11.
2. Разенков И.А. Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 52–63.

*V.A. Banakh, I.A. Rzenkov. Aerosol lidar for study of the backscatter amplification in the atmosphere.*  
**Part II. Construction and experiment.**

Construction of the aerosol lidar with two receiving channels for study of the effect of amplification of radiation power backscattered in the atmosphere is described in the paper. One of the receiving (monostatic) channels coincides with the transmitter channel, the other one (bistatic) receives the backscattered radiation at small angle to the probing beam axis. Relation of the echo signal power registered in monostatic channel to that in bistatic channel is a measure of the effect of backscatter amplification. The results of lidar atmospheric experiments show that, as a rule, power of echo-signal registered in monostatic channel exceeds that in bistatic one.