

Турбулентный лидар. I. Конструкция

И.А. Разенков*

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

Поступила в редакцию 23.05.2017 г.

Созданы две модификации лазерной локационной системы, работа которой основана на эффекте усиления обратного рассеяния. Система предназначена для дистанционного измерения интенсивности «оптической» турбулентности. Турбулентный микроимпульсный аэрозольный лидар имеет два приемных канала, один из которых регистрирует повышение эхосигнала на оси лазерного пучка, когда интенсивность атмосферной турбулентности растёт. Второй приемный канал на усиление обратного рассеяния не реагирует и нужен для калибровки. Эффект усиления проявляется в узкой области пространства вокруг оси лазерного пучка, поэтому апертура приемника должна быть небольшой и сравнимой с зоной Френеля. Создание турбулентного лидара стало возможным благодаря появлению компактных микроимпульсных лазеров с диодной накачкой с высокой частотой следования импульсов. Лидар позволяет осуществлять непрерывные продолжительные наблюдения в автоматическом режиме. Важно, что система безопасна для глаз. Предложено две схемы создания турбулентного лидара на основе афокального телескопа Мерсена (зеркальный коллиматор). Приводится описание турбулентных лидаров УОР-2 и УОР-3. На основе приближения Воробьева для статистически однородной турбулентной среды предложен алгоритм обращения лидарных данных в структурную постоянную «оптической» турбулентности C_n^2 .

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, усиление обратного рассеяния, лидар; atmospheric turbulence, backscatter amplification effect, lidar.

Введение

Эффект усиления обратного рассеяния (УОР) был открыт в 1973 г. [1, 2]. Теоретически, а позже и экспериментально было показано, что при обратном рассеянии света в случайно-преломляющей среде интенсивности падающей и рассеянной волн коррелируют, если волны распространяются через одни и те же неоднородности среды. Теоретические исследования усиления обратного рассеяния описаны в работах [3–7]. Для количественного выражения эффекта УОР используют коэффициент пропорциональности N между средними интенсивностями в случайной I_1 и в однородной I_0 средах. В общем случае фактор N описывает пространственное перераспределение средней интенсивности обратного рассеяния. В случае точечного приемника и рассеяния назад фактор усиления $N = N_0 = I_1/I_0$ максимальный [1].

Идея создания турбулентного лидара на основе эффекта УОР впервые была высказана А.С. Гурвичем [8–10]. Он предложил дистанционно импульсным аэрозольным локатором определять профиль фактора N , который затем должен быть обращен в распределение структурной характеристики «оптической» турбулентности C_n^2 по трассе зондирования.

1. Принцип работы УОР-лидара

Принцип работы турбулентного лидара упрощенно показан на рис. 1.

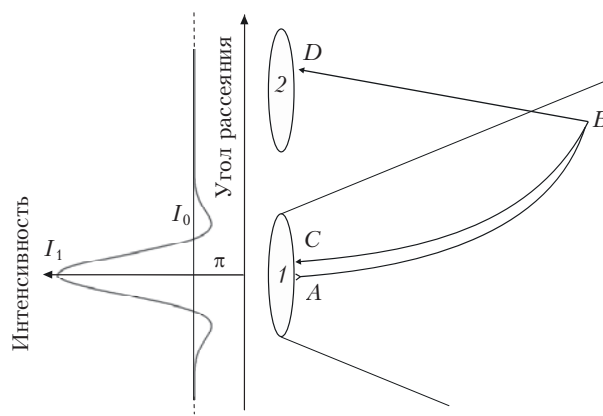


Рис. 1. Концепция турбулентного лидара: 1 – передающий и осевой приемные каналы; 2 – внеосевой приемный канал; распределение интенсивности эхосигнала (левая часть рисунка)

Передатчик 1 формирует и отправляет в атмосферу коллимированный пучок, который в случайной среде уширяется. Пусть луч из точки A распространяется до точки B. При рассеянии назад

* Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru).

эффект УОР повышает вероятность фокусировки рассеянного света в точку C , которая совпадает с точкой излучения A . С меньшей вероятностью рассеянное излучение может прийти, например, в точку D . Этот факт показан в левой части рисунка на профиле интенсивности эха. Прибор должен измерять *среднюю интенсивность* эхосигнала на оптической оси лазерного пучка. Совместить оси передатчика и приемника и одновременно осуществить непрерывное измерение интенсивности для получения среднего значения возможно только при использовании *микроимпульсного лазера*. Лидар имеет два приемника: первый (осевой) совмещен с передатчиком 1 , второй (внеосевой) приемник 2 располагается рядом. УОР оказывает влияние только на осевой канал 1 , поэтому его эхосигнал становится больше эхосигнала внеосевого приемного канала 2 . Отношение сигналов позволяет получить фактор усиления N .

Отметим, что лучи на первый приемник приходят под меньшими углами к оси, чем на второй. Приемная апертура осевого канала 1 не должна превышать угловой размер пика усиления I , иначе произойдет усреднение интенсивности и эффект усиления не будет обнаружен.

2. Две схемы зондирования

Регистрация эхосигналов в приемных каналах должна производиться *одновременно*. Рассеянное излучение поступает в приемные каналы из одного объема атмосферы, поэтому нормирование эхосигнала первого приемного канала на эхосигнал второго позволяет определить фактор N и одновременно *исключает влияние неоднородного распределения коэффициента обратного рассеяния по трассе*.

Рассмотрим возможные способы построения лидарного приемника. На рис. 2, *а* схематично показано сечение пика усиления обратного рассеяния 1 . Первый способ представлен на рис. 2, *б*. Он реализует *схему зондирования № 1 с разнесением*, когда осевой 2 и внеосевой 3 приемные каналы расположены под некоторым углом друг другу.

На рис. 2, *б* диаграмма направленности 2 осевого приемника отмечена темно-серым цветом. Приемник интегрирует по апертуре и регистрирует некое значение интенсивности, большее, чем среднее значение I_0 . Диаграмма направленности внеосевого приемника (светло-серая) предназначена для определения интенсивности I_0 .

Второй метод регистрации УОР представляет собой *совмещенную схему зондирования № 2* (рис. 2, *в*). Максимум диаграммы направленности осевого канала 2 совпадает с максимумом пика усиления 1 ; диаграмма направленности внеосевого канала 3 в направлении назад (π) имеет минимум. Оба приемных канала совмещены и имеют одну приемную апертуру.

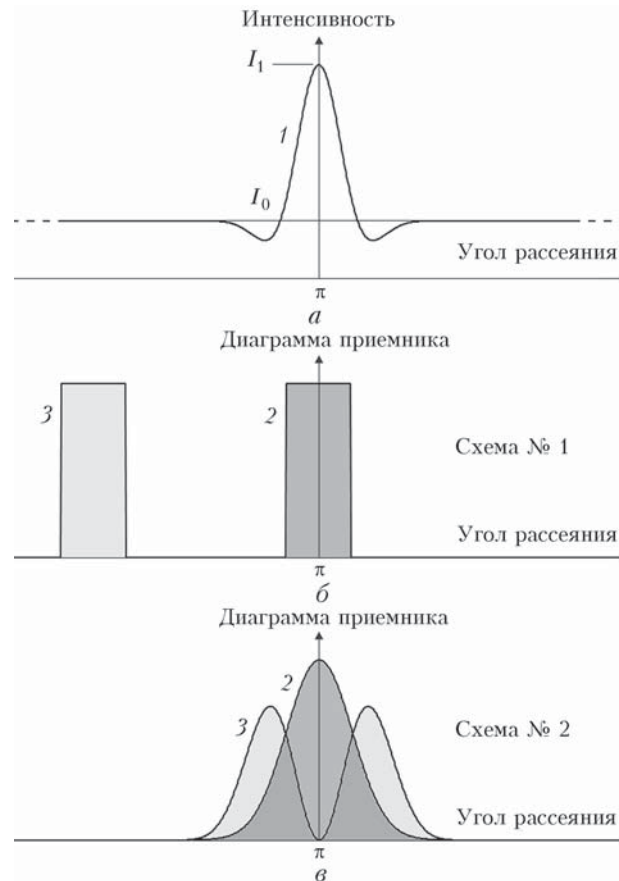


Рис. 2. Пик интенсивности 1 усиления обратного рассеяния (*а*); схема зондирования с разнесением осевого 2 и внеосевого 3 приемных каналов (*б*); совмещенная схема зондирования (*в*)

3. Общие замечания

Предварительно сделаем некоторые пояснения относительно практической реализации конструкции турбулентного лидара, который можно рассматривать как специализированный микроимпульсный прибор. Его особенности приведены в [12]. Специфика создания УОР-лидара диктуется особенностями эффекта усиления обратного рассеяния, на котором основана работа этой системы.

1. УОР-лидар относится к классу *микроимпульсных систем* [11–15]. В них частота следования лазерных импульсов высокая (тысячи герц), а энергия зондирующих импульсов низкая (не превышает одной тысячной джоуля); при этом средний уровень отправляемой в атмосферу мощности излучения достаточно высокий — сотни милливатт.

2. В основном канале УОР-лидара должен быть только один приемо-передающий телескоп. Такие системы называют *лидарами с расширением лазерного пучка через приемный телескоп*. В них оси передатчика и приемника точно совмещены. В такой конструкции в момент посылки зондирующего импульса в атмосферу рассеянное на оптических элементах излучение попадает на детектор

и ослепляет его. Именно поэтому низкая энергия лазерного импульса — необходимое условие работы фотоприемников.

3. Лидарные системы с полностью совмещенными передатчиком и приемником имеют *повышенную термомеханическую стабильность*, т.е. возникающие внутри системы деформации не приводят к разъюстировке оптико-механической схемы. Дело в том, что если по какой-то причине происходит деформация оптической скамьи и оси передатчика и приемника расходятся, то после расширения пучков приемо-передающим телескопом эта ошибка уменьшается, например в 10 раз при увеличении телескопа 10^{\times} .

4. Слабые зондирующие импульсы дают слабый эхосигнал, поэтому турбулентный лидар должен работать с накоплением сигнала в *режиме счета фотонов*. Высокая частота следования импульсов и оптимальный выбор интервала накопления эхосигнала позволяют обеспечить достаточную точность определения фактора N . Режим счета фотонов обеспечивает динамический диапазон принимаемого сигнала ~ 60 дБ, т.е. от единичных фотонов до миллионов. Заметим, что сам факт продолжительного накопления большого количества импульсов как нельзя кстати подходит для работы с использованием УОР-эффекта, который предполагает усреднение сигнала [1].

5. Низкий уровень энергии зондирующих импульсов и их расширение приемо-передающим телескопом гарантирует низкий уровень плотности оптического излучения на выходе из лидара. Это важное обстоятельство позволяет отнести турбулентный лидар к классу *безопасных для глаза человека* лазерных систем.

4. Конструкция приемопередатчика УОР-2

При разработке турбулентного лидара должны приниматься во внимание следующие условия: 1) основной приемный канал, обозначаемый как первый (осевой), должен быть точно совмещен с передающим каналом; 2) размер приемной апертуры осевого канала должен быть равен апертуре передатчика; 3) система должна иметь дополнитель-

ный приемный канал, который позволит определить среднее значение сигнала и исключить влияние флуктуаций коэффициента обратного рассеяния в зондируемом объеме атмосферы; 4) диаграмма направленности осевого приемного канала должна быть достаточно узкой, чтобы регистрировать интенсивность пика усиления; 5) диаграмма направленности внеосевого приемного канала должна располагаться либо в стороне от осевого канала, либо быть шире диаграммы осевого приемного канала.

Для моделирования лидара можно использовать программу оптического дизайна Zemax [16] или подобную. Оптическая схема, в частности, позволяет определить диаграммы направленности приемных каналов, которые полезно использовать в расчетах.

На рис. 3 показана модель оптической схемы лидара УОР-2. Пучок от лазера 1 зеркалом 3 направляется на светоделительную пластинку 4 и затем на афокальный телескоп 5–6, который в 10 раз расширяет пучок, и он через отверстие в экране 7 уходит в атмосферу. На рисунке изображены рассеянные лучи, часть из которых проходит во второе отверстие в экране 7 и в итоге через делитель 4, фокусирующую линзу 9 и апертурную диафрагму 10 поступает на фотодетектор 13 внеосевого приемного канала. Аналогичным образом лучи эхосигнала осевого канала поступают на фотодетектор 12. (Добавление новых элементов в схему сопровождается добавлением новых номеров на рис. 4, 5.)

Оптическая схема лидара УОР-2 (2014 г.) показана на рис. 4. УОР-2 — экспериментальная лабораторная конструкция, в которой было использовано имеющееся в наличии параболическое зеркало диаметром 400 мм. Основой системы является афокальный зеркальный телескоп Мерсена, составленный из зеркал 5 и 6, увеличение телескопа 10^{\times} . В этом лидаре реализована схема зондирования № 1 с разделением осевого и внеосевого приемных каналов.

Для дополнительных исследований на выходе из системы был добавлен диск 8 с круглыми отверстиями разного диаметра. Диск закреплен на шаговом двигателе и управляется компьютером. Сквозь отверстие в диске 8 пучок уходит в атмосферу. Рассеянное излучение возвращается обратно и попадает внутрь системы через то же самое отверстие (осевой канал) и через отверстие в экране 7 (внеосевой канал). Оба входящих пучка поступают

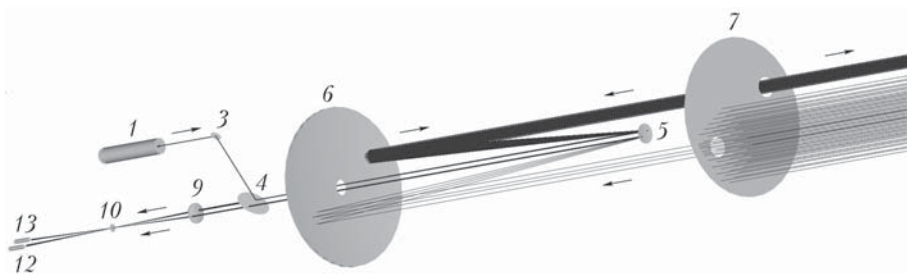


Рис. 3. Модель Zemax приемопередатчика лидара УОР-2. Обозначения см. в тексте

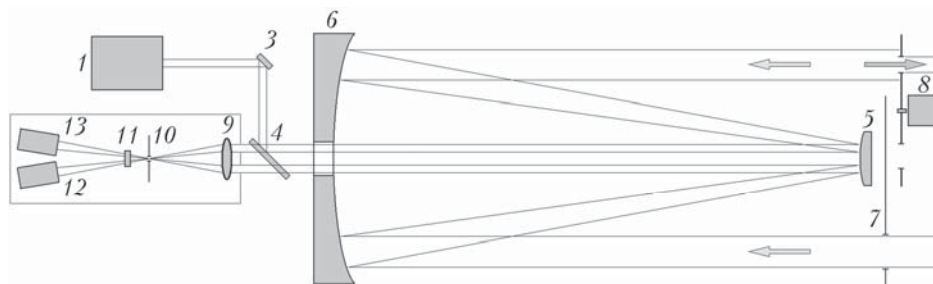


Рис. 4. Оптическая схема экспериментального лидара УОР-2 с разнесением осевого и внеосевого приемных каналов на основе 400-миллиметрового афокального телескопа Мерсена

на телескоп, сужаются в 10 раз и направляются на пластинку 4. Половина мощности эхосигналов проходит сквозь нее и линзой 9 фокусируется на апертурной диафрагме 10, которая формирует поле зрения лидара, равное $2\varphi = r_d / (f_9 M_{tel}) = 330$ мкрад ($r_d = 1$ мм – диаметр диафрагмы 10, $f_9 = 300$ мм – фокусное расстояние линзы 9 и $M_{tel} = 10^{\times}$ – увеличение телескопа 5–6). За диафрагмой 10 расположен фильтр 11, отсекающий фоновую засветку неба, и два фотодетектора (ФЭУ) 12 и 13. Параметры лидара УОР-2 приведены в табл. 1.

Таблица 1
Параметры лидара УОР-2

Передатчик	
Лазер	IPG Photonics GLPM-10-Y13
Длина волны	532 нм
Длительность импульса	2 нс
Частота повторения	50 кГц
Мощность лазера	500 мВт
Энергия в импульсе	10 мкДж
Качество пучка	TEM ₀₀ , M ² < 1,3
Размер пучка (~1/e ²)	70 мм
Расходимость пучка	< 30 мкрад
Приемник	
Афокальный телескоп	Мерсен
Диаметр телескопа	400 мм
Увеличение телескопа	10 [×]
Число каналов	2
Апертура приемника	10...70 мм
Разнос приемников	250 мм
Поле зрения	330 мкрад
Пространственное разрешение	2 м
Время накопления	5 мин
Фотоприемник (ФЭУ)	10%

В лидаре, где оси передатчика и приемника совмещены, всегда должен быть элемент, который сводит эти оси вместе. Такой элемент называют «антенным переключателем». В лидаре УОР-2 на рис. 3, 4 в качестве переключателя действует светоделительная пластинка 4 (50/50). Двойное пропускание антенного ключа характеризует его эффективность. Светоделительная пластинка – самый простой переключатель; пропускание равно $0,5^2 = 0,25$.

Заметим, что на пути лазерного пучка внутри лидара не должно быть перпендикулярных к нему поверхностей, ни линзовых, ни зеркальных, чтобы не повредить детекторы из-за отражений. Это обстоятельство может препятствовать применению линзовых коллиматоров. Использование нами зеркального коллиматора привело к увеличению габаритов конструкции, но при этом обеспечило стабильное положение осей приемных каналов относительно передатчика.

5. Конструкция приемопередатчика УОР-3

На рис. 5 приведена оптическая схема экспериментального лидара УОР-3 (2015 г.). Для этой системы был изготовлен афокальный зеркальный телескоп Мерсена диаметром 300 мм с относительным отверстием 2,5 и увеличением 15[×]; корпус телескопа и оптическая скамья сделаны из композитных материалов с низким коэффициентом температурного расширения. В системе установлены три фотоприемника, так как в ней реализованы две схемы зондирования: с совмещением и с разнесением осевого и внеосевого приемных каналов.

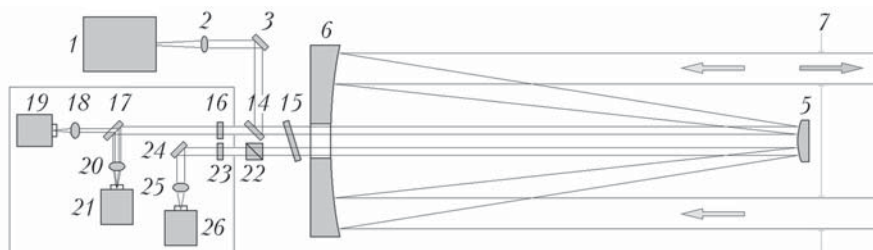


Рис. 5. Трехканальная экспериментальная оптическая схема лидара УОР-3, в которой одновременно реализованы схема № 1 с разнесением и схема № 2 с совмещением осевого и внеосевого приемных каналов

Для повышения эффективности новой системы мы применили другой антенный переключатель и детекторы с более высокой квантовой эффективностью – кремниевые лавинно-пролетные фотодиоды (ЛПД). Размер чувствительной площадки ЛПД маленький (100 мкм), поэтому мы отказались от апертурной диафрагмы 10 (см. рис. 3) и «поместили» ее прямо на детектор. Детекторы стали выполнять роль апертурных диафрагм, что упростило приемную часть лидара.

На рис. 5 световой импульс от лазера 1 коллимируется линзой 2 и зеркалом 3 направляется на тонкопленочный поляризатор 14. Излучение лазера линейно поляризовано в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка. Лазерный импульс отражается от поляризатора 14 и сквозь четвертьволновую пластинку 15, имеющую небольшой наклон по отношению к лазерному пучку, направляется на телескоп 5–6. После прохождения излучения сквозь пластинку 15 его поляризация становится круговой. Телескоп расширяет зондирующий пучок в 15 раз. На выходе из системы располагается экран 7 с парой одинаковых круглых 60-миллиметровых отверстий. Лазерный коллимированный пучок уходит в атмосферу, а рассеянное излучение возвращается обратно и проходит через эти отверстия.

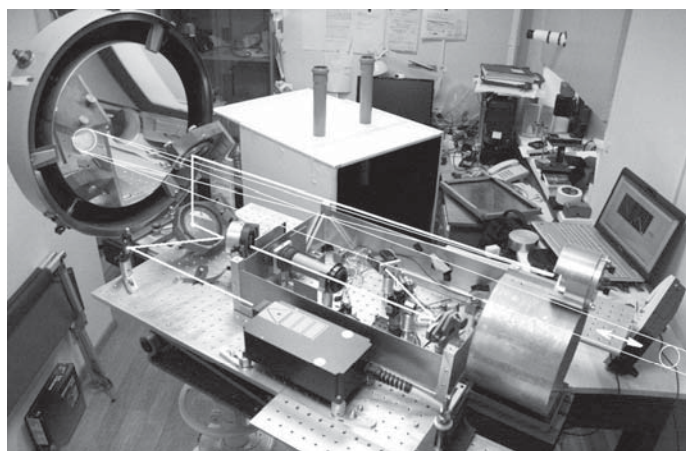
Приходящие пучки поступают на телескоп, сужаются и вторично проходят сквозь четвертьволновую пластинку 15, после чего круговая поляризация вновь преобразуется в линейную, но при этом происходит поворот плоскости поляризации на 90°, и она теперь лежит в плоскости рисунка. Излучение осевого канала полностью проходит сквозь поляризатор 14 и направляется в приемный ящик. Излучение внеосевого канала идет через поляризационный куб 22, выполняющий роль анализатора и отсекающий кросс-поляризованное излучение, которое могло возникнуть в атмосфере в результате рассеяния на несферических частицах. Это необходимо делать, так как в осевом приемном канале кросс-поляризованное излучение поляризатором 14 отправляется обратно в лазер и в приемный ящик

не проходит. В данной схеме антенный переключатель состоит из тонкопленочного поляризатора 14 и четвертьволновой пластинки 15. Его пропускание в лидаре УОР-3 составило 0,83.

Далее располагается пара фильтров 16 и 23, отсекающих фоновую засветку неба. В осевом приемном канале реализована совмещенная схема зондирования, поэтому осевой пучок делится на две части зеркалом 17, которое имеет 4-миллиметровое отверстие на оси пучка. Излучение осевой части пучка проходит в отверстие и линзой 18 собирается на площадке детектора 19. Оставшаяся кольцевая часть осевого пучка отражается от зеркала 17 и линзой 20 собирается на площадке детектора 21. Внеосевой пучок зеркалом 24 направляется на линзу 25 и регистрируется детектором 26. Параметры лидара УОР-3 приведены в табл. 2. Внешний вид лидаров УОР-2 и УОР-3 показан на рис. 6.

Таблица 2
Параметры лидара УОР-3

<i>Передачик</i>	
Лазер	Cobolt Tor 532
Длина волны	532 нм
Длительность импульса	5 нс
Частота повторения	6 кГц
Мощность лазера	240 мВт
Энергия в импульсе	40 мкДж
Качество пучка	TEM ₀₀ , M ² <1,2
Размер пучка (~1/e ²)	60 мм
Расходимость пучка	<30 мкрад
<i>Приемник</i>	
Афокальный телескоп	Мерсен
Диаметр телескопа	300 мм
Увеличение телескопа	15×
Число каналов	3
Апертура приемника	60 мм
Разнос приемников	200 мм
Поле зрения	150 и 350 мкрад
Пространственное разрешение	15 м
Время накопления	5 мин
Фотоприемник (ЛПД)	50%



а



б

Рис. 6. Лидар УОР-2 со снятым кожухом (а) и лидар УОР-3 (б); белыми линиями обозначены пучки осевого приемно-передающего канала

Важный параметр турбулентного лидара – размер апертуры осевого приемного канала R_a . В лидаре с совмещением каналов (схема № 2) приходящие фотоны распределяются между двумя приемниками. Введем «эффективный радиус» $R_{эфф}$ для апертуры осевого приемного канала. Пусть φ – половина поля зрения приемника и $F(\theta)$ – его диаграмма направленности, которая показывает долю зарегистрированных фотонов, пришедших на апертуру под углом θ . Для определения функции $F(\theta)$ мы пользовались моделью Zemax оптической схемы для лидара УОР-3. Диаграммы направленности показаны на рис. 2, в. Эффективный размер апертуры рассчитывается по формуле

$$R_{эфф} = R_a \left[\frac{1}{\pi\varphi^2} \int_0^{\varphi} \int_0^{2\pi} F \left(\sqrt{(\rho \cos(\psi))^2 + (\rho \sin(\psi))^2} \right) \rho d\psi d\rho \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где ρ и ψ – переменные интегрирования.

Для схемы зондирования № 1 с разнесением приемных каналов все пришедшие фотоны в пределах конуса $\pm\varphi$ (поле зрения) должны быть зарегистрированы детектором. Это означает, что $F(|\theta| \leq \varphi) = 1$, $F(|\theta| > \varphi) = 0$ и $R_{эфф} = R_a$. Для схемы № 2 с совмещением приемных каналов $F(|\theta| \leq \varphi) < 1$, поэтому $R_{эфф} < R_a$. Для лидара УОР-3 $R_{эфф} = 13$ мм, когда $R_a = 30$ мм.

6. Калибровка лидара

Для схемы зондирования № 1 запишем лидарные уравнения для осевого и внеосевого приемных каналов в приближении однократного рассеяния:

$$P_1(x, R_a, C_n^2) = E_0 C_1 G_1(x) \beta(x) \left[1 + q(x, R_a, C_n^2) \right] \times \frac{1}{x^2} \exp \left(-2 \int_0^x \alpha(x') dx' \right); \quad (2)$$

$$P_2(x) = E_0 C_2 G_2(x) \beta(x) \frac{1}{x^2} \exp \left(-2 \int_0^x \alpha(x') dx' \right). \quad (3)$$

Здесь x – расстояние от лидара; $q(x, R_a, C_n^2)$ – фактор влияния турбулентности на среднюю мощность рассеянного света на приемнике [7]; C_n^2 – структурная характеристика «оптической» турбулентности по трассе; R_a – радиус приемной апертуры; E_0 – энергия посылаемого в атмосферу импульса; C_1 и C_2 – аппаратные постоянные, учитывающие пропускание приемо-передающего тракта, площадь антенны и эффективность детекторов; $G_1(x)$ и $G_2(x)$ – геометрические функции приемных каналов; $\beta(x)$ – коэффициент обратного рассеяния; $\alpha(x)$ – коэффициент ослабления. Фактор q связан с фактором N простым соотношением $N = q + 1$.

Фактор q определяется из отношения эхосигналов (2) и (3):

$$q(x, R_a, C_n^2) = C_0(x) \frac{P_1(x, R_a, C_n^2)}{P_2(x)} - 1, \quad (4)$$

где $C_0(x) = \frac{C_2 G_2(x)}{C_1 G_1(x)}$ – функция калибровки.

Определим функцию $C_0(x)$ в спокойной атмосфере, когда турбулентность отсутствует ($C_n^2 \approx 0$) и, следовательно, фактор влияния турбулентности $q(x, R_a, C_n^2) \approx 0$. Из выражения (4)

$$C_0(x) = \frac{P_2(x)}{P_1(x, R_a, 0)}. \quad (5)$$

На практике функция калибровки $C_0(x)$ определяется из анализа массива лидарных данных не менее чем за сутки. При этом выбирается момент времени, когда отношение эхосигналов (5) максимальное, а это соответствует минимальному значению интенсивности турбулентности. Функция $C_0(x)$ плавная, поэтому для уменьшения влияния шумов ее рекомендуется интерполировать степенным полиномом, применяя метод наименьших квадратов.

Реальный сигнал $\tilde{P}_1(x)$ ($\tilde{P}_2(x)$) представляет собой сумму эхосигнала $P_1(x)$ ($P_2(x)$), фоновой засветки P_{BG1} (P_{BG2}) и последствий фотоприемников $P_{AP1}(x)$ ($P_{AP2}(x)$) в результате ослепления лазерным импульсом:

$$\tilde{P}_1(x) = P_1(x) + P_{BG1} + P_{AP1}(x); \quad (6)$$

$$\tilde{P}_2(x) = P_2(x) + P_{BG2} + P_{AP2}(x). \quad (7)$$

Для получения сигналов $P_1(x)$ и $P_2(x)$ из выражений (6) и (7) необходимо предварительно определить профили $P_{AP1}(x)$ и $P_{AP2}(x)$, закрыв выход в атмосферу, чтобы $P_1(x) = 0$ и $P_2(x) = 0$. Для определения фона P_{BG1} (P_{BG2}) следует брать сигнал на конце трассы зондирования, где $P_{AP1}(x) \approx 0$ ($P_{AP2}(x) \approx 0$), $P_1(x) \approx 0$ ($P_2(x) \approx 0$).

Примеры эхосигналов и профилей последствий для лидара УОР-2 показаны на рис. 7. Лидар УОР-2 работает только по горизонтальной 2-километровой трассе. Пучок упирается в стену, поэтому присутствует короткий пик. Кривые 1 и 2 – это сигналы последствий ФЭУ $P_{AP1}(x)$ и $P_{AP2}(x)$. Детектор осевого канала 1 засвечивается сильнее, следовательно, $P_{AP1}(x) > P_{AP2}(x)$. Внеосевой приемный канал расположен в стороне от осевого, в связи с этим его геометрический фактор имеет «мертвую» зону и эхосигнал $P_2(x)$ начинается с дистанции ~500 м. Эхосигнал осевого канала $P_1(x)$ идет от начала трассы. Эффект усиления приводит к повышению осевого сигнала относительно внеосевого. Это видно на рис. 7, а, где сигналы осевого 3 и внеосевого 4 каналов плавно расходятся. На рис. 7, б представлены пример функции калибровки $C_0(x)$ и факторы q для ситуаций с разными уровнями интенсивности турбулентности.

В лидаре УОР-2 используется волоконный итербийевый лазер с преобразователем на вторую гармонику (532 нм). Минимальная частота следования лазерных импульсов 50 кГц, поэтому максимальная дальность зондирования составляет 3 км.

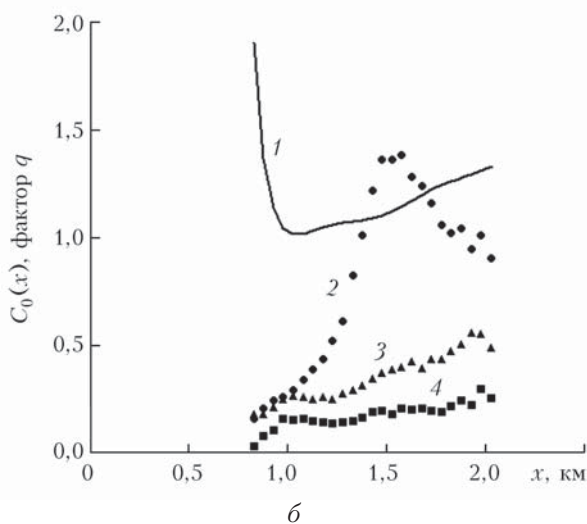
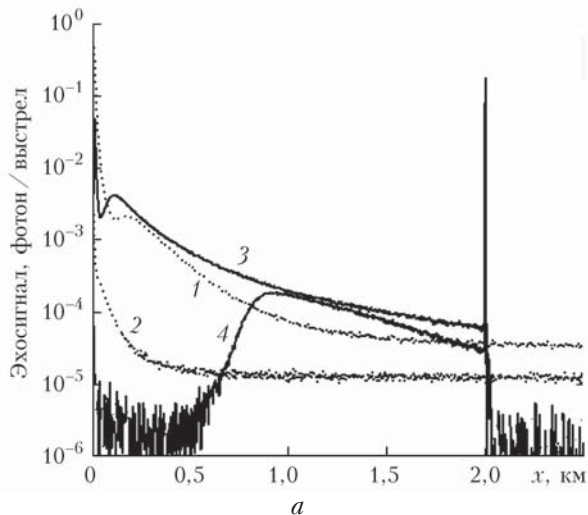


Рис. 7. Пример последствия детекторов (кривые 1 и 2) и эхосигналов (кривые 3 и 4) лидара УОР-2; пик на дистанции 2 км от экрана (а); пример функции калибровки $C_0(x)$ (кривая 1) и факторы q (кривые 2–4), полученные при разных значениях интенсивности турбулентности; время накопления профиля 5 мин; запись 24.02.2017 г. (б)

По этой причине лидар работает в «стенку» на дистанции 2 км, чтобы при регистрации избежать наложения соседних эхосигналов.

7. Определение C_n^2 на горизонтальной трассе (по Воробьеву)

Для определения структурной постоянной «оптической» турбулентности C_n^2 по трассе мы воспользовались приближенной формулой Воробьева [7], которая была получена для схемы зондирования № 1 с разнесением приемных каналов. Воробьев определил фактор q , как «фактор влияния турбулентности на среднюю мощность рассеянного света на приемнике». Для случая статистически однородной турбулентной среды ($C_n^2(x) = \text{const}$) им было получено приближение

$$q(x, R_a, C_n^2) = \frac{0,49 C_n^2 k_0^{7/6} x^{11/6}}{[1 + 0,4 R_a^2 / r_F^2(x)]^{7/6}}, \quad (8)$$

где $r_F(x) = \sqrt{x/k_0}$ – масштаб Френеля; $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны.

Пусть $\tilde{q}(x, R_a)$ – профиль фактора влияния турбулентности, полученный в эксперименте при зондировании апертурой R_a . Для определения C_n^2 на интервале x_1 и x_2 предлагается использовать простой алгоритм, который заключается в минимизации функционала

$$\left\{ \int_{x_1}^{x_2} [\tilde{q}(x, R_a) - q(x, R_a, C_n^2)]^2 dx \right\} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Заключение

Турбулентный лидар с самого начала создавался как микроимпульсная система, в которой расширение лазерного пучка осуществляется через передаточный афокальный телескоп. Конструкция лидара отличается повышенной термомеханической стабильностью, обеспечивает его непрерывную работу и безопасна для глаз.

Рассмотрены две схемы построения лидарного приемника. В схеме № 1 с разнесением внеосевой приемный канал располагается в стороне от осевого передаточного канала. В совмещенной схеме № 2 осевой и внеосевой приемные каналы имеют общую оптическую ось, совпадающую с осью передатчика. Описаны конструкции двух действующих экспериментальных микроимпульсных турбулентных лидаров: УОР-2 с двумя приемными каналами и УОР-3 с тремя каналами.

Рассмотрен вопрос о калибровке, которая учитывает эффект ослепления фотодетекторов в момент послышки светового импульса в атмосферу, разную геометрию и чувствительность приемных каналов турбулентного лидара.

Для однородной горизонтальной трассы предложено определять структурную характеристику C_n^2 из лидарных данных с помощью асимптотического приближения Воробьева.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 14-17-00386).

1. Виноградов А.Г., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Эффект усиления обратного рассеяния на телах, помещенных в среду со случайными неоднородностями // Изв. вузов. Радиофиз. 1973. Т. 16, № 7. С. 1064–1070.
2. Виноградов А.Г., Гурвич А.С., Кашкаров С.С., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Закономерность увеличения обратного рассеяния волн. Свидетельство на открытие № 359. Приоритет открытия: 25 августа 1972 г. в части теоретического обоснования и 12 августа 1976 г. в части экспериментального доказательства закономерности. Государственный реестр открытий СССР // Бюл. изобретений. 1989. № 21.
3. Банакх В.А., Смалыхо И.Н. Определение интенсивности оптической турбулентности по обратному атмосферному рассеянию лазерного излучения // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 300–307; Banakh V.A., Smalikhov I.N. Determination of optical

- turbulence intensity by atmospheric backscattering of laser radiation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 5. P. 457–465.
4. *Смалихо И.Н.* Расчет коэффициента усиления обратного рассеяния лазерного излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере, с использованием численного моделирования // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 9. С. 796–800; *Smalikho I.N.* Calculation of the backscatter amplification coefficient of laser radiation propagating in a turbulent atmosphere using numerical simulation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 2. P. 135–139.
 5. *Банах В.А.* Усиление средней мощности обратно рассеянного в атмосфере излучения в режиме сильной оптической турбулентности // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 857–862; *Banakh V.A.* Enhancement of the laser return mean power at the strong optical scintillation regime in a turbulent atmosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 2. P. 90–95.
 6. *Воробьев В.В., Виноградов А.Г.* Влияние фоновой турбулентности в лидарных исследованиях турбулентности ясного неба // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 12. С. 1015–1022; *Vorob'ev V.V., Vinogradov A.G.* Effect of background turbulence in lidar investigations of clear air turbulence // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 2. P. 134–141.
 7. *Воробьев В.В.* О применимости асимптотических формул восстановления параметров «оптической» турбулентности из данных импульсного лидарного зондирования. I. Уравнения // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 10. С. 870–875.; *Vorob'ev V.V.* On the applicability of asymptotic formulas of retrieving “optical” turbulence parameters from pulse lidar sounding data: I – Equations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 2. P. 156–161.
 8. *Гурвич А.С.* Лидарное зондирование турбулентности на основе эффекта усиления обратного рассеяния // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2012. Т. 48, № 6. С. 655–665.
 9. *Гурвич А.С.* Лидарное позиционирование областей повышенной турбулентности ясного неба // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2014. Т. 50, № 2. С. 166–174.
 10. *Лидар:* Пат. № 116245. Россия, МПК, G01S 17/88. Гурвич А.С.; Ин-т физ. атмосфер. им. А.М. Обухова РАН. № 2011150933/28; Заявл. 15.12.2011; Оpubл. 20.05.2012. Бюл. № 14.
 11. *Устройство* для регистрации усиления обратного рассеяния в атмосфере: Пат. 153460. Россия, МПК, G01S 17/95. Разенков И.А., Банах В.А., Надеев А.И.; Ин-т оптики атмосфер. им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2014149551/28; Заявл. 10.12.2014; Оpubл. 20.07.2015. Бюл. № 20.
 12. *Разенков И.А.* Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 1. С. 52–63; *Razenkov I.A.* Aerosol lidar for continuous atmospheric monitoring // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 4. P. 308–319.
 13. *Банах В.А., Разенков И.А., Смалихо И.Н.* Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния. I. Компьютерное моделирование // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 1. С. 5–11.
 14. *Banakh V.A., Razenkov I.A., Smalikho I.N.* Laser echo signal amplification in a turbulent atmosphere // *Appl. Opt.* 2015. V. 54, N 24. P. 7301–7307.
 15. *Банах В.А., Разенков И.А.* Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния. II. Конструкция и эксперимент // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 2. С. 113–119.
 16. *URL:* <http://www.zemax.com> (last access: 11.04.2017).

I.A. Razenkov. Turbulent lidar. I. Design.

Two designs of the laser radar system operating on the basis of the backscatter amplification effect (BSA) are suggested. The system is, in fact, a micro-pulse aerosol lidar with two receiving channels, one of which records an increase in the echo signal on the laser beam axis with an increase in the atmospheric turbulence intensity. The BSA effect has place in a narrow spatial region around the laser beam axis; so, the receiver aperture should be small enough. The creation of the turbulent lidar became possible with the advent of compact pulsed lasers with pulse energies lower than mJ and pulse repetition rates of several kHz. The lidar is intended for continuous long-term unattended operation. It is eye safe. Two schemes of the turbulent lidar on the basis of an afocal Mersenne telescope (mirror collimator) are suggested. BSA-2 and BSA-3 turbulent lidars are described. On the basis of Vorob'ev's approximation for statistically homogeneous turbulent environment, an algorithm is suggested for retrieval of the structure parameter of optical turbulence C_n^2 from lidar data.