

УДК 535.361.551:511.6:621.371

Экспериментальная оценка пика увеличения обратного рассеяния

И.А. Разенков*

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

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

Приведены результаты эксперимента по исследованию распределения интенсивности рассеянного излучения на приемопередающей апертуре турбулентного лидара. Зондирование производилось по горизонтальной трассе в условиях умеренной турбулентности узким лазерным пучком, расположенным в центре приемной апертуры, радиус которой можно было изменять. При увеличении размера приемной апертуры относительный вклад в эхосигнал за счет турбулентности уменьшался. Было получено, что эффект УОР локализован в центре приемной апертуры: максимум пика рассеянного излучения располагается на оси зондирующего пучка, а его размер примерно равен размеру пучка; на периферии при удалении от оси пучка средняя интенсивность рассеянного излучения медленно понижается до фонового значения. Полученный результат может быть использован на практике для оптимального выбора параметров приемопередатчика при создании турбулентного лидара.

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

Введение

Принцип действия турбулентного лидара основан на эффекте увеличения обратного рассеяния, который возникает при двукратном распространении лазерного пучка в случайной среде [1, 2]. Увеличение/усиление обратного рассеяния (УОР) проявляется в повышении средней интенсивности рассеянного излучения на оси передатчика при зондировании турбулентной атмосферы. Это повышение (или пик) можно интерпретировать как результат деформации индикатрисы рассеяния в направлении назад в зависимости от интенсивности турбулентности либо как увеличение сечения рассеяния для угла π . Из закона сохранения потока энергии рассеянной волны следует, что вокруг пика увеличения средней интенсивности должна существовать область, где интенсивность меньше некоторого фонового значения [1]. За фоновое рассеяние можно принять рассеяние на молекулах и частицах. Поскольку интересующие нас углы рассеяния мало отличаются от угла π , индикатрисы фонового рассеяния можно считать постоянной.

Мощность принимаемого эхосигнала – это интеграл от интенсивности рассеянного излучения по площади приемной апертуры. При отсутствии турбулентности в малой окрестности угла π величину индикатрисы рассеяния можно считать равномерной, тогда эхосигнал будет зависеть только от размера приемной апертуры [4]. В случае неравномерного распределения рассеянного света, когда есть

турбулентность, можно ожидать, что с изменением размера (радиуса) приемной апертуры эхосигнал уже не будет пропорционален ее площади из-за эффекта УОР.

При прямом распространении света в турбулентной атмосфере возникают флуктуации интенсивности. При обратном рассеянии принципиальное значение имеет свойство обратимости, вследствие которого на приемной апертуре также возникают флуктуации интенсивности, коррелирующие с флуктуациями интенсивности в атмосфере. После временного осреднения флуктуирующей интенсивности на приемной апертуре повышается средняя интенсивность по сравнению с ситуацией, когда свет распространяется в однородной среде, т.е. при отсутствии флуктуаций («чистый» эффект УОР). Средняя интенсивность также будет расти по отношению к сигналу на идентичной приемной апертуре, но расположенной в стороне от зондирующего пучка, поскольку флуктуации интенсивности на ней теперь не будут коррелировать с флуктуациями интенсивности в атмосфере («относительный» эффект УОР) [3]. Действие турбулентного лидара основано на «относительном» эффекте УОР, поэтому у него один передающий канал и два принимающих, первый из которых точно совмещен с передающим каналом, а другой расположен в стороне [5, 6].

Максимум (пик) рассеянного излучения, возникающий при эффекте УОР, совпадает с осью передатчика [1, 6], поэтому если последовательно производить зондирование приемными апертурами разного размера при условии, что имеет место осевая симметрия, то можно исследовать распределение рассеянной интенсивности по сечению приемной апертуры.

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

1. Лидар и условия эксперимента

В качестве экспериментальной установки мы использовали стационарный турбулентный лидар УОР-2 [5] с одним передающим каналом и двумя принимающими. Эхосигнал основного приемного канала P_1 нормируется на эхосигнал дополнительного приемного канала P_0 . Это позволяет выделить турбулентную добавку к эхосигналу основного канала (фактор q) и автоматически исключить влияние изменения рассеивающих свойств атмосферы вдоль направления зондирования. Турбулентный лидар работает в режиме счета фотонов, поэтому одновременно с накоплением эхосигналов производится осреднение флуктуаций интенсивности рассеянного излучения, необходимое при работе с УОР. Лидар относится к классу микроимпульсных безопасных для глаз лазерных систем.

Схема лидара, приведенная на рис. 1, в последние годы была модифицирована, но принципиальных изменений не претерпела. В качестве источника излучения 1 используется микроимпульсный твердотельный лазер Sobolt (532 нм) с пассивной модуляцией добротности. С помощью сменной коллимирующей линзы 2 можно перестраивать размер выходного пучка 11. После линзы 2 узкий коллимированный пучок зеркалом 3 направляется на тонкопленочный поляризатор 4, от которого отражается и зеркалами 5 и 6 вводится внутрь $10\times$ афокального телескопа, состоящего из двух параболических зеркал 8 и 9 (система Мерсена). Диаметр главного зеркала 9 составляет 40 см. Для преобразования линейной поляризации уходящего излучения в круговую используется четвертьволновая пластинка 7.

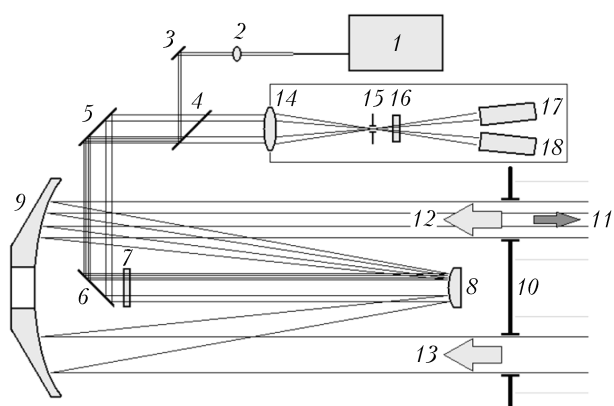


Рис. 1. Оптическая схема экспериментального турбулентного лидара УОР-2; обозначения см. в тексте

Перед телескопом установлен сменный экран 10 с парой круглых отверстий одинакового диаметра. Через центр верхнего отверстия в атмосферу направляется пучок 11. Рассеянное в атмосфере излучение поступает обратно в лидар через верхнее и нижнее отверстия в экране 10. Приходящий через верхнее отверстие пучок основного приемного канала 12 точно совмещен с осью передатчика, поэтому эффект

УОР действует на него напрямую. Пучок дополнительного приемного канала 13 находится в стороне, поэтому эффект УОР на него практически не влияет.

После прохождения через четвертьволновую пластинку 7 поляризация пучков 12 и 13 из круговой преобразуется обратно в линейную, а ее плоскость поворачивается на 90° по отношению к поляризации лазерного пучка. Поэтому пучки 12 и 13 проходят сквозь тонкопленочный поляризатор 4 и заходят в приемный блок. Поляризатор 4 и четвертьволновая пластинка 7 образуют антенный переключатель, совмещающий оптические оси передатчика и приемника. На входе в приемный блок стоит собирающая линза 14, затем полевая диафрагма 15, интерференционный светофильтр 16 и детекторы 17 и 18.

Для уменьшения влияния фоновой засветки эксперимент проводился после захода солнца в середине февраля 2020 г. Горизонтальная трасса зондирования проходила над городом. После обработки часть данных отбраковывалась, так как предпочтение отдавалось записям, когда имела место умеренная интенсивность турбулентности, которая в течение 2 ч оставалась примерно постоянной, а трасса зондирования была статистически однородной.

Один цикл измерений включал в себя серию актов зондирования со сменными экранами 10 (см. рис. 1) и калибровку, при которой производилась запись с закрытым черным экраном выходом в атмосферу для определения функции последействия фотоприемников [5]. Использовались девять сменных экранов, в каждом на расстоянии 150 мм была пара круглых отверстий одинакового диаметра от 10 до 90 мм. Диаметр коллимированного гауссова лазерного пучка составлял 20 мм, время осреднения эхосигналов – 5 мин, пространственное разрешение системы регистрации было задано равным 40 м. В случае минимальной приемной апертуры 10 мм размер пучка тоже был 10 мм, поэтому время накопления было увеличено до 1 ч. Смена экранов производилась вручную, один цикл измерений занимал 2 ч.

2. Процедура обработки данных зондирования

Поместим центр приемопередающей апертуры лидара, т.е. основного приемного канала, в начало прямоугольных координат так, чтобы направление распространения совпадало с осью x . Положение осей y и z роли не играет, так как имеет место симметрия относительно оси x . Мощность принимаемого эхосигнала $P(x, \rho)$ в окрестности точки $\rho(y, z)$ на приемной апертуре связана с интенсивностью рассеянного излучения $I(x, \rho)$ соотношением

$$P(x, \rho) = I(x, \rho) dS, \quad (1)$$

где x – расстояние от лидара; $dS = d^2\rho$ – малая площадка на приемной апертуре.

Фактор q влияния эффекта УОР на среднюю мощность рассеянного света на приемнике определяется через отношение эхосигнала основного

приемного канала $P_1(x, R)$ и дополнительного $P_0(x, R)$ [7] следующим образом:

$$q(x, R) = \frac{P_1(x, R)}{P_0(x, R)} - 1, \quad (2)$$

где R – радиус приемной апертуры. Если размеры основной и дополнительной приемных апертур равны, тогда с учетом (1) выражение (2) можно записать как

$$q(x, R) = \frac{\iint_S I_1(x, \rho) d^2\rho}{I_0(x)S} - 1 \quad (3)$$

при условии, что интенсивность рассеянного света дополнительного приемного канала $I_0(x)$ на апертуре площадью S постоянная.

Предполагается, что зондирование осуществляется последовательно с помощью набора апертур разного радиуса. Представим приемную апертуру в виде круга в центре и набора вложенных колец. Пусть индексу $k = 0$ соответствует круг радиусом R_0 , равный самой маленькой апертуре из набора. И пусть k -е кольцо ($k \geq 1$) имеет внешний радиус R_k , а внутренний R_{k-1} . С учетом сказанного перепишем выражение (3) в дискретном виде для апертуры радиусом R_i :

$$q_i(x) = \frac{\sum_{k=0}^i I_{1,k}(x)S_k}{I_0(x)\sum_{k=0}^i S_k} - 1, \quad (4)$$

где S_k – площадь кольца с внешним радиусом R_k и внутренним R_{k-1} ; $I_{1,k}$ – средняя интенсивность эхосигнала основного приемного канала в кольце площадью S_k . Разделим числитель и знаменатель в выражении (4) на $I_0(x)$ и введем обозначение нормированной интенсивности $I'_{1,k}(x) = I_{1,k}(x)/I_0(x)$, тогда (4) примет вид

$$q_i(x) = \frac{\sum_{k=0}^i I'_{1,k}(x)S_k}{\sum_{k=0}^i S_k} - 1, \quad (5)$$

Из выражения (5) получаем рекуррентную формулу для интенсивности i -го кольца $I'_{1,i}$, которая определяется через интенсивности при меньших апертурах:

$$I'_{1,i}(x) = \frac{(q_i(x) + 1)\sum_{k=0}^i S_k - \sum_{k=0}^{i-1} [I'_{1,k}(x)S_k]}{S_i}. \quad (6)$$

3. Результаты эксперимента

На рис. 2, *a* приведены данные зондирования от 15 февраля 2020 г. за один полный цикл: с 20:00 до 21:00 была произведена запись данных для апертур с $R = 10$ –45 мм, а с 19:00 до 20:00 производилось осреднение для самой маленькой апертуры с $R = 5$ мм. По данным радиометра МТР-5, во время проведения измерений термическая стратификация атмосферы была неустойчивой с градиентом около -1 °C/100 м. На рис. 2, *a* для разных радиусов приемных апертур приведено семейство функций $q(x, R)$. Важно, что при малых приемных апертурах радиусом 5 и 10 мм на расстоянии ~ 5 км фактор $q(x) > 9$, что означает 10-кратное повышение сигнала в основном приемном канале по отношению к дополнительному. Как следует из поведения зависимостей на рис. 2, *a*, при увеличении радиуса приемной апертуры турбулентная добавка в виде фактора $q(x, R)$ убывает, а в пределе – стремится к нулю.

Из данных $q(x, R)$ на рис. 2, *a* можно получить зависимости $q(R)$ для апертур с $R = 5$ –45 мм, если зафиксировать расстояние от лидара $x = 2, 3, 4, 5$ и 6 км (рис. 2, *б*). С использованием (6) был

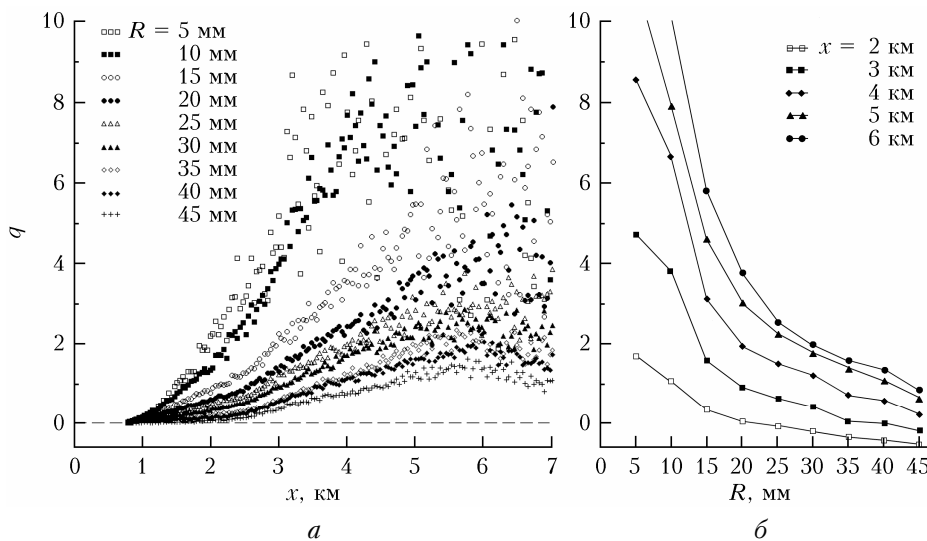


Рис. 2. Пространственные профили экспериментальных функций $q(x, R)$ для апертур с $R = 5$ –45 мм (*a*) и зависимости $q(R)$ для дистанций 2, 3, 4, 5 и 6 км (*б*). Лидар УОР-2, $C_n^2 = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$, г. Томск, 19:00–21:00, 15 февраля 2020 г.

проведен расчет распределения относительной интенсивности рассеяния $I_1^*(x, R)$ для $x = 2, 3$ и 4 км, показанный на рис. 3. Для дистанций более 4 км расчет не представлен, так как при апертурах радиусом 5 и 10 мм на таких расстояниях фактор q определялся с большой погрешностью (см. рис. 2, а). Заметим, что для апертуры 5 мм размер пучка тоже был равен 5 мм, так как сменные экраны с апертурами устанавливались на выходе из лидара (см. рис. 1).

Из (6) следует, что для начальной апертуры ($R_0 = 5$ мм) величина относительной интенсивности I_1^* совпадает со значением q_0 для выбранной дистанции. На рис. 3 значения фактора $q(R)$ показаны кружками, а распределение интенсивности $I_1^*(R)$ – в виде ступенчатого графика. В эксперименте величина структурной характеристики C_n^2 , полученная из лидарных данных с помощью приближения Воробьева для статистически однородной турбулентности [7], равна $1,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$.

Радиус когерентности, рассчитанный по формуле Фрида, $\rho_c = 1,68(C_n^2 k^2 x)^{-3/5}$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны, на рис. 3 показан пунктиром. Радиус когерентности $\rho_c = 12,9; 10,1$ и $8,5$ мм для расстояний $2, 3$ и 4 км соответственно. Важно отметить, что радиус когерентности примерно равен как радиусу пучка (10 мм), так и ширине пика увеличения обратного рассеяния ($\sim 10\text{--}15$ мм) на рис. 3.

Проанализируем полученный результат распределения интенсивности обратного рассеяния по сечению приемной апертуры. В целом вид графиков относительной интенсивности $I_1^*(R)$ незначительно отличается от поведения фактора $q(R)$. Наблюдается резкое понижение интенсивности обратного рассеяния сразу за пределами зондирующего пучка при $R > 10$ мм. Этот факт указывает на то, что эффект УОР в основном локализован внутри зондирующего пучка, где имеет место когерентное сложение рассеянных волн [3]. Для подтверждения мы провели другой эксперимент, в котором изменялся размер зондирующего пучка и о котором будет сказано ниже.

На всех графиках рис. 3 при увеличении размера приемной апертуры сначала имеет место резкое понижение интенсивности, а затем идет пологий участок, высота которого для максимальной апертуры 45 мм примерно равна единице, т.е. близка к фоновому значению обратного рассеяния. Пик УОР с относительной интенсивностью больше единицы возникает в результате перераспределения рассеянного излучения [1], а из закона сохранения следует, что вокруг пика должна существовать область, где значения относительной интенсивности меньше единицы. Экспериментально зарегистрировать эту область затруднительно, так как ее площадь много больше площади пика [3] и, следовательно, ее относительная интенсивность незначительно отличается от единицы в меньшую сторону.

На рис. 4 представлены результаты зондирования лазерными пучками диаметром 20 и 40 мм

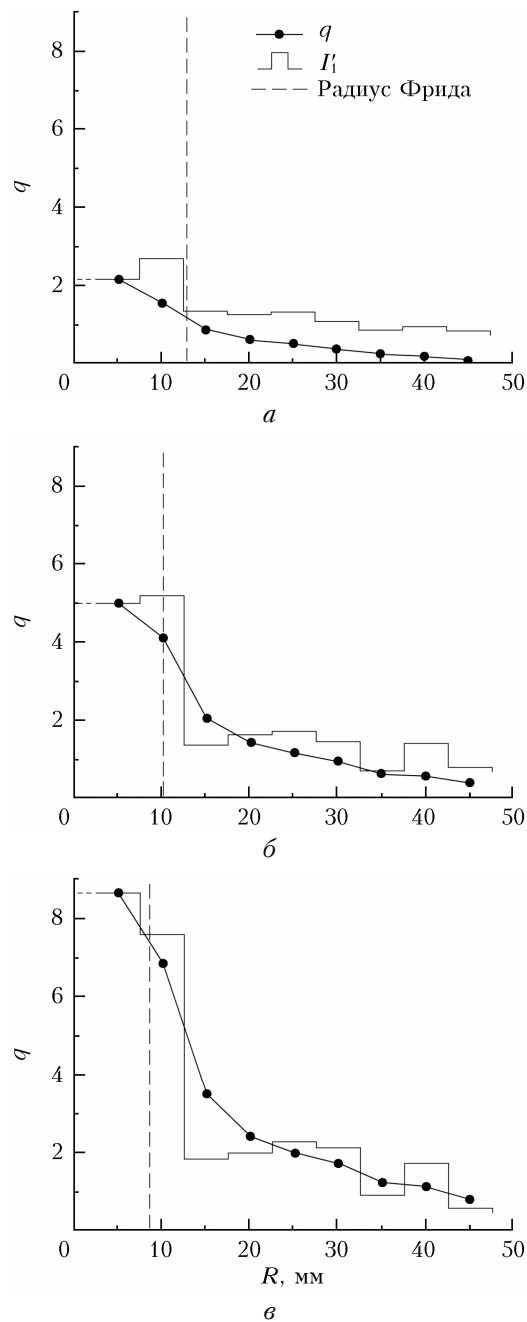


Рис. 3. Значение фактора q и распределение нормированной средней интенсивности I_1^* по сечению пика УОР для дистанций 2 (а), 3 (б) и 4 км (в); радиус пучка 10 мм. Лидар УОР-2, г. Томск, 19:00–21:00, 15 февраля 2020 г.

для приемных апертур $26, 50, 70$ и 90 мм, причем зондирующие пучки всегда располагались внутри приемных апертур. Было получено, что экспериментальные функции $q_1(x, R)$ и $q_2(x, R)$ для пучков 20 и 40 мм для приемных апертур одинакового радиуса различаются незначительно, т.е. $q_1(x, R) \approx q_2(x, R)$. Этот факт подтверждает предположение о том, что когерентное сложение, т.е. формирование пика УОР, фактически имеет место внутри зондирующего пучка. Небольшое уменьшение фактора q

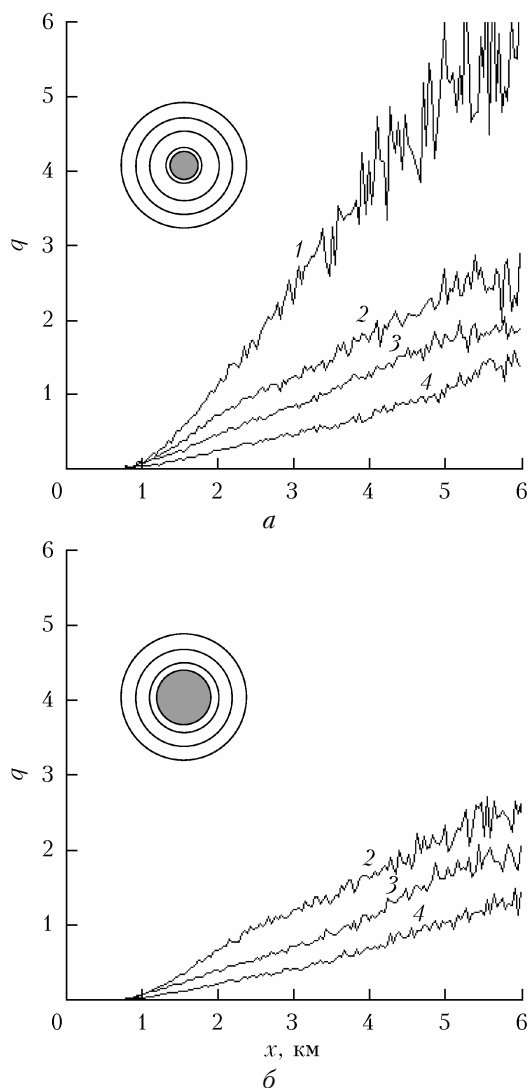


Рис. 4. Фактор q при зондировании пучками радиусом 10 (а) и 20 мм (б). Концентрические окружности показывают размер приемных апертур (1 – 13 мм, 2 – 25 мм, 3 – 35 мм, 4 – 45 мм) относительно апертуры зондирующего пучка. Лидар УОР-2, г. Томск, 20:13–20:46, 13 февраля 2020 г.

для пучка 40 мм по отношению к пучку 20 мм, видимо, связано с увеличением передающей апертуры относительно r_c .

4. Результаты и обсуждение

Результаты эксперимента показывают, что эффект УОР в основном зависит от размера приемной апертуры при условии, что зондирующий пучок не превышает ее размер. Полагаем, что приемопередатчик турбулентного лидара будет сконструирован оптимально, если лазерный пучок будет немного меньше размера приемной апертуры.

Ранее мы уже исследовали пик УОР, используя отражение от диффузного рассеивающего экрана, установленного на удалении 2 км [6]. Рассеянное экраном излучение регистрировалось миниатюрным

объективом. При зондировании пучком 45 мм объектив перемещался через центр лазерного пучка, а при работе с пучком 5 мм сканировалось отражение от светоделительной пластинки [8]. В обоих случаях регистрируемый размер пика УОР был немного шире зондирующего пучка. Результаты описанного здесь эксперимента по зондированию в турбулентной атмосфере с апертурами разного размера подтверждают полученный ранее результат [6].

В [9] на основании проведенных расчетов сделан вывод о том, что для дистанции 9 км в случае зондирующего пучка диаметром 4 см на $\lambda = 0,5$ мкм требуется приемная апертура 24 см. Такой вывод не подтверждается результатами наших измерений. Используя формулу (9) из работы [7], можно рассчитать, что на дистанции 9 км величина фактора $q(x)$ для апертуры 24 см будет в 8 раз меньше, чем для апертуры 5 см. Очевидно, что апертура 5 см будет предпочтительней апертуры 24 см. Кроме того, если при средней интенсивности турбулентности зондировать пучком 4 см, а принимать апертурой 24 см, тогда на дистанции 5 км значение фактора $q(x)$ окажется ниже порога чувствительности турбулентного лидара из-за преобладания фонового рассеяния над турбулентной УОР-добавкой к эхосигналу.

Как видно, от размера приемной апертуры зависит чувствительность лидара: апертура не должна быть ни слишком маленькой, ни слишком большой. При маленькой апертуре потребуется время осреднения порядка 1 ч, а при большой апертуре будет проблематично выделить турбулентную добавку q на фоне большого сигнала дополнительного канала P_0 . Мы полагаем, что приемная апертура может быть немного больше передающей, но не должна от нее сильно отличаться. Одновременное увеличение передающей и приемной апертур также не будет оптимальным, так как позволит увеличить эхосигнал дополнительного канала P_0 , но турбулентная добавка q при этом будет расти только до тех пор, пока радиус передающей апертуры будет сравним с радиусом когерентности r_c . Из этого следует, что должно быть некое компромиссное решение относительно размеров апертур приемопередатчика турбулентного лидара.

Эксперимент показал, что оптимальный размер передающей апертуры должен быть близок к r_c . Допустим, требуется создать лидар, работающий до дистанции $x = 10$ км. Если за среднее значение интенсивности турбулентности принять $C_n^2 = 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, тогда получим $r_c = 22$ мм ($\lambda = 532$ нм). Следовательно, оптимальный радиус передающей апертуры – 20–25 мм. Радиус приемных апертур может быть либо равен радиусу передающей апертуры, либо быть немного больше ее, например 25–30 мм.

Для удобства введем «апертурную формулу турбулентного лидара», которая в миллиметрах показывает размеры передающей, основной и дополнительной приемных апертур. Например, на основании проведенного исследования апертурная формула оптимального приемопередатчика может быть «40-50-50» или «50-60-60». Турбулентный лидар с апертурной формулой «40-50-50» будет иметь большую

чувствительность, но время накопления данных при этом увеличится по отношению к системе с апертурной формулой «50-60-60».

Апертурная формула нашего переносного лидара УОР-4 [10], который уже несколько лет работает в полевых условиях, — «50-50-50». Экспериментальный лидар УОР-2 [5], на котором были получены представленные здесь результаты, стационарный, и его апертурная формула может перестраиваться от «10-10-10» до «60-90-90».

Заключение

Проведен эксперимент, в котором зондирование производилось узким лазерным пучком, а прием осуществлялся апертурами разного размера. Это позволило оценить распределение интенсивности обратно рассеянного сигнала по сечению зондирующего пучка при зондировании турбулентной атмосферы, когда имеет место эффект увеличения обратного рассеяния. Получено, что турбулентная добавка к эхосигналу благодаря эффекту увеличения обратного рассеяния формируется в пределах лазерного пучка. Оптимальный размер зондирующего пучка должен быть близок к радиусу поперечной когерентности (радиус Фрида).

На основании полученных результатов сформулированы практические рекомендации для геометрии лидарного приемопередатчика. Оптимальный диаметр лазерного пучка — 40–50 мм, диаметр основного и дополнительного приемных каналов — 50–60 мм. Предложено использовать «апертурную формулу» для описания приемопередатчика турбулентного лидара.

Работа выполнена по проекту фундаментальных исследований РАН (№ АААА-А17-117021310149-4).

I.A. Razenkov. Experimental estimation of the backscatter enhancement peak.

The results of an experiment in which the intensity distribution of scattered radiation at the transmitting-receiving aperture of a turbulent lidar was studied are presented. Sounding was performed along a horizontal path in moderate turbulence with a narrow laser beam located in the center of the receiving aperture, the size of which could be changed. As the size of the receiving aperture increased, the relative contribution to the echo signal due to turbulence decreased. It was found that the BSE effect localized in the center of the receiving aperture: the peak of the scattered radiation is located at the axis of the sounding beam, and its size is approximately equal to the beam size; at the periphery, the average intensity of scattered radiation slowly decreased to background values as the distance from the beam axis increased. The result can be used in practice for optimal selection of parameters of the transceiver when designing a turbulent lidar.

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. *Гурвич А.С.* Лидарное зондирование турбулентности на основе усиления обратного рассеяния // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 655–665.
3. *Кравцов Ю.А., Саичев А.И.* Эффекты двукратного прохождения волн в случайно неоднородных средах // Успехи физ. наук. 1982. Т. 137, Вып. 3. С. 501–527.
4. *Лазерный контроль атмосферы* / под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
5. *Разенков И.А.* Турбулентный лидар. I. Конструкция // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 41–48; *Razenkov I.A.* Turbulent lidar: I – Design // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 273–280.
6. *Разенков И.А.* Турбулентный лидар. II. Эксперимент // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 2. С. 81–89; *Razenkov I.A.* Turbulent lidar: II – Experiment // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 281–289.
7. *Воробьев В.В.* О применимости асимптотических формул восстановления параметров «оптической» турбулентности из данных импульсного лидарного зондирования. II. Результаты численного моделирования // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 987–993; *Vorob'ev V.V.* On the applicability of asymptotic formulas of retrieving “optical” turbulence parameters from pulse lidar sounding data: II – Results of numerical simulation // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 2. P. 162–168.
8. *Разенков И.А.* Оптимизация параметров турбулентного лидара // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 1. С. 70–81; *Razenkov I.A.* Optimization of parameters of a turbulent lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 3. P. 349–360.
9. *Банах В.А., Фалиц А.В., Залозная И.В.* Усиление средней мощности эхосигнала пространственно ограниченного лазерного пучка в турбулентной атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 5. С. 371–375.
10. *Razenkov I.A., Banakh V.A., Gorgeev E.V.* Lidar “BSE-4” for the atmospheric turbulence measurements // Proc. SPIE. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2505183> (last access: 28.04.2020).