

УДК 551.501.793

Г. П. Арумов, А. В. Бухарин, А. В. Тюрин

*Институт космических исследований РАН, 117997, ул. Профсоюзная, дом 84/32, E-mail:
tumbul@iki.rssi.ru*

**РЕЖИМ НЕФЕЛОМЕТРА ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ЗАДАЧЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИДАРНОГО ОТНОШЕНИЯ НА ОТКРЫТЫХ ТРАССАХ
ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТНОЙ КОРРЕКЦИИ
ОБРАТНОГО СИГНАЛА**

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен нефелометр с работой лазера в импульсном режиме (режим лидара), с режимом прямоугольной формы (линейная коррекция обратного сигнала), с режимом треугольной формы импульса (квадратичная коррекция обратного сигнала). Для этих режимов существует две возможности для аналога локальной калибровки; в первом случае используется отношение сигналов в режимах квадратичной и линейной коррекции, во втором отношение сигналов в режимах линейной коррекции и режиме лидара. При этом трассовая зависимость отношения обратных сигналов является линейной в обоих случаях. Показано преимущество первого режима по сравнению со вторым в задаче измерения коэффициента экстинкции (КЭ). При калибровке для измерения коэффициента обратного рассеяния (КОР) преимущество имеет квадратичная коррекция поскольку для нее требуется минимальное использование ослабляющих фильтров. Предложен индикатор степени однородности трассы. Этим индикатором является одновременное измеренное значение КЭ с использованием указанных двух режимов работы нефелометра. Для неоднородной атмосферы измеренные значения КЭ будут разными. Для измерения геометрических искажений зондирующего пучка следует использовать дополнительный приемный канал. Отношение обратных сигналов на дополнительном и основном приемных каналах при наличии локальной калибровки является индикатором искажений зондирующего пучка. Одновременное измерение КОР и КЭ делает режим нефелометра эффективным инструментом для определения лидарного отношения.

**ОДНОПОЗИЦИОННАЯ СХЕМА, КОАКСИАЛЬНАЯ СХЕМА, ДИСТАНЦИОННОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ, КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТ
ЭКСТИНКЦИИ, ДИОДНЫЙ ЛАЗЕР, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ФОРМФАКТОР,
НЕФЕЛОМЕТР, ЛИДАР, РАССЕЯНИЕ, КАЛИБРОВКА, АТТЕНЮАТОР**

ВВЕДЕНИЕ

Ранее рассмотрена модель нефелометра обратного рассеяния для измерения базовых коэффициентов (коэффициента обратного рассеяния (КОР) и коэффициента экстинкции (КЭ)) [1]. В этой модели используется импульс с линейным убыванием интенсивности. В момент когда интенсивность равна нулю включается приемный детектор, причем длительность интервала включения детектора равна длительности лазерного импульса. При такой модуляции обратный сигнал от рассеивающей поверхности начиная с некоторой дистанции перестает зависеть от расстояния до рассеивающего слоя. Вклад в сигнал

обратного рассеяния от различных слоев практически одинаков. Длина зондируемой дистанции ограничена длительностью лазерного импульса. Для обычного лидарного зондирования характерным является квадратичное убывание сигнала обратного рассеяния. Основной вклад в сигнал обратного рассеяния дают ближние слои. Для измерения КЭ в лидаре используются в основном два метода. На трассе фиксированной дальности, КЭ измеряется по сигналу отраженному топографическим объектом. При этом обратный сигнал от поверхности и из атмосферы различаются в десятки раз. В такой ситуации сигнал из атмосферы и отраженный топографическим объектом сигнал должны быть пространственно разнесены. Например для надежного одновременного измерения КОР и КЭ топографический объект должен находиться на расстоянии 385 м, тогда КОР измеряется вдоль слоя 100 м от лидара (рис. 1).

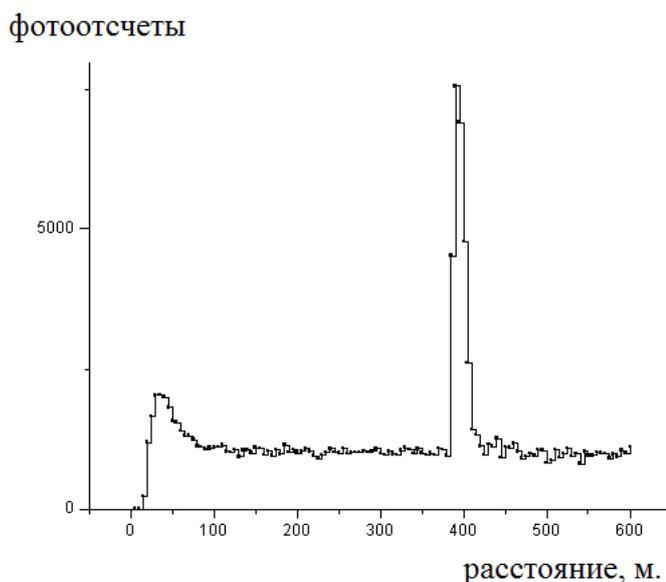


Рис. 1. Характерный вид обратного сигнала из атмосферы при импульсном зондировании

Сигналы отличаются приблизительно в 10 раз, при этом неизвестна трассовая структура аэрозольных слоев. Следовательно, импульсный режим лидара измеряет сигнал только в достаточно близкой зоне, для измерения КЭ необходима удаленность топографического объекта. Для открытых трасс зондирования КЭ определяется по скорости убывания полученного после измерений сигнала обратного рассеяния из атмосферы посредством коррекции на квадрат расстояния. Однако, использование методов регрессии не дает возможности определять КЭ с достаточной точностью.

Базовые коэффициенты могут быть использованы в методах линейных оценок как индикаторы микроструктуры атмосферы для заданной местности [2]. Если предположения об однородности зондируемой трассы обоснованы, то можно определить лидарное отношение (КОР/КЭ). Это отношение необходимо для решения лидарного уравнения.

Представим себе зондирующую систему для которой сигнал обратного рассеяния от слоя практически не зависит от положения слоя вдоль трассы зондирования (вырожденная аппаратная функция). Преимуществом такой системы будет возможность определить КОР вдоль всей трассы. Отсутствие квадратичного убывания сигнала вдоль заданной трассы позволяет разработать более точные способы измерения КЭ на открытых трассах. Такой режим зондирования можно реализовать посредством нефелометра обратного рассеяния. Отметим, что режим нефелометра не дает возможности дать пространственное разрешение вдоль зондируемой среды, но за счет модуляции интенсивности лазера существует возможность реализации зондирующей системы с вырожденной аппаратной функцией.

ГЕОМЕТРИЯ ЗОНДИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Будем рассматривать лидар с коаксиальной схемой зондирования [3]. В этой схеме поле зрения основного приемного канала совпадает с зондирующим пучком. В Идеальной Схеме (ИС) поле зрения равно угловому размеру пучка на всей трассе. Для модели ИС предполагаем, что приемник и передатчик являются точечными и находятся в одной точке. В такой схеме оптические оси приемного и передающего каналов совпадают.

В режиме лидара [4] импульс очень малой длительности облучает зондируемый объект. Одновременно с импульсом лазера включается приемник. Для рассеивающей поверхности, находящейся на расстоянии z , обратный (отраженный) сигнал имеет задержку $t = 2z/c$ относительно начала включения приемника.

В приближении геометрической оптики (ГО) временная развертка мощности $P(t)$ обратного сигнала составляет [5]

$$P_{\pi}(t) = CI_{\pi}(z)|_{z=ct/2}, \text{ где } I_{\pi}(z) = I_0(z^2\varphi^2(z))^{-1}, \varphi(z) = a(l^{-1} + z^{-1}). \quad (1)$$

Здесь $P_{\pi}(t)$ – мощность обратного сигнала для ИС в момент времени t , C – постоянная, $I_{\pi}(z)$ – максимальная интенсивность обратного сигнала в точке $O(0; 0)$, I_0 – интенсивность пучка на выходе из передающего канала в точке $O(0; 0)$, z – расстояние до объекта (плоскость, слой), $\varphi(z)$ – угловой размер пучка (поля зрения) на расстоянии z от входной апертуры лидара, l – продольный размер ИС, a – радиус входной апертуры приемного канала, c – скорость света. Наличием атмосферы в диапазоне от 0 до z пренебрегаем. Тогда трассовая зависимость (1) представляет собой аппаратную функцию ИС. Из (1) следует, что в режиме лидара амплитуда сигнала в момент времени t обратно пропорциональна площади пятна, ограниченного полем зрения приемного канала. На малых расстояниях угловой размер пучка $\varphi(z)$, наблюдаемый из плоскости входной апертуры приемного канала, стремится к бесконечности, на больших расстояниях $\varphi(z) = a/l$.

Аппаратную функцию ИС можно измерить по трассовой зависимости обратного сигнала от рассеивающей поверхности, ориентация которой не меняется вдоль всей трассы или Сигнал от Ориентированной Поверхности (СОП). В общем случае такие измерения представляют собой значительные технические трудности [1].

РЕЖИМЫ РАБОТЫ НЕФЕЛОМЕТРА И ЛИДАРА

Рассмотрим другой режим работы ИС в качестве нефелометра на рис. 2. В начале создается импульс лазера, постоянной интенсивности I_l в течение времени τ . В момент окончания лазерного импульса, включается приемник в интервале от τ до 2τ . Для такого режима работы производится зондирование трассы в диапазоне $0 \leq z \leq L$, $L = c\tau/2$. Эквивалент длительности строка $L = c\tau/2$ может существенно превышать масштаб убывания сигнала обратного рассеяния с расстоянием l ($L \gg l$). В дальнейшем используем приближение $L = c\tau/2 \gg l$.

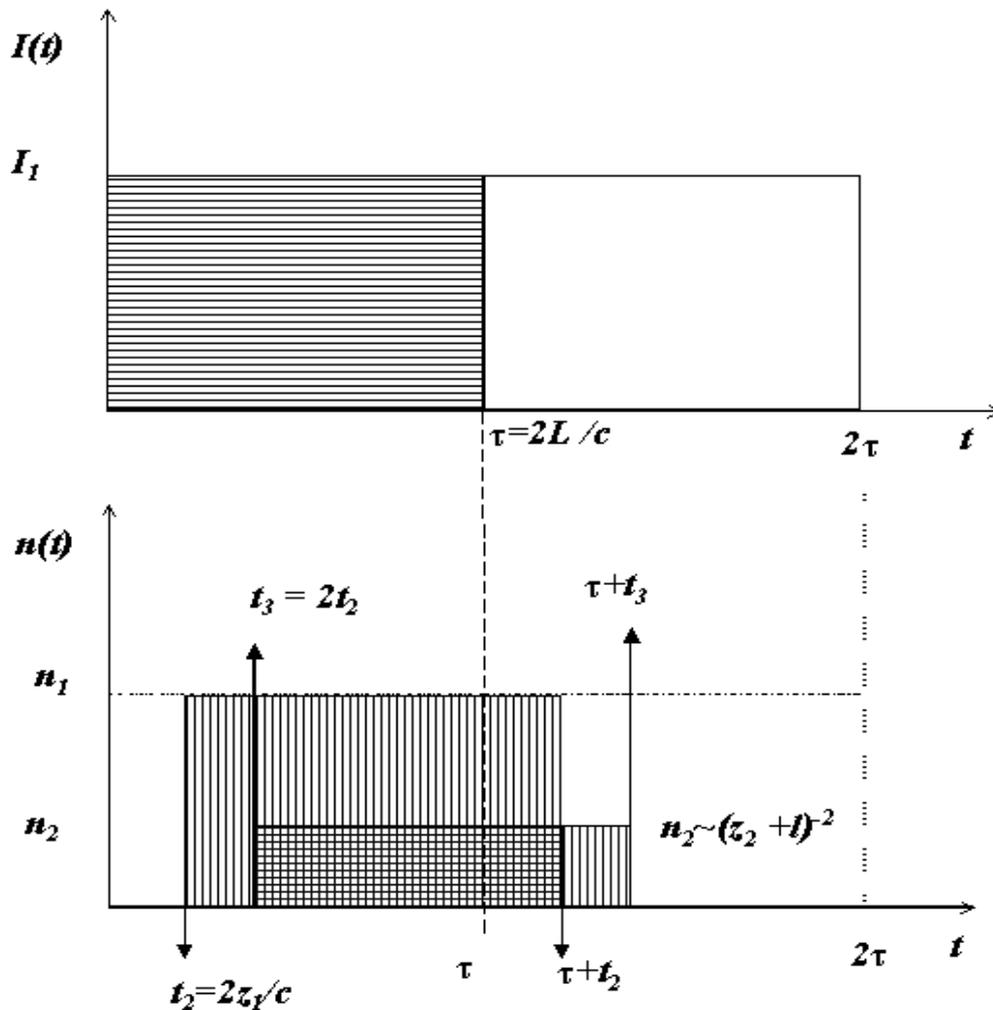


Рис. 2. Режим работы нефелометра с линейной коррекцией обратного сигнала

Для тонкого слоя, расположенного внутри трассы на расстоянии z_1 , обратный сигнал в интервале от τ до 2τ представляет собой фрагмент ступеньки с горизонтальным размером $t_2 = 2z_1/c$ (см прямоугольник от τ до $\tau + t_2$ и n_1 по вертикали). Если расстояние до тонкого слоя увеличить в 2 раза ($z_2 = 2z_1$), то в 2 раза увеличится сторона прямоугольника по горизонтали. На рис. 2 сигналу обратного рассеяния от тонкого слоя $z_2 = 2z_1$ соответствует прямоугольник со стороной $t_3 = 2t_2$ по горизонтали (прямоугольник с вертикальной штриховкой). Соответственно увеличится площадь прямоугольника в 2 раза (см прямоугольник от τ до $\tau + t_3$ и n_2 по вертикали). Амплитуда обратного сигнала уменьшается от n_1 до n_2 из-за квадратичного убывания с расстоянием. Если тонкий слой находится на выходной апертуре нефелометра $z_1 = 0$, то обратный сигнал близок к нулю, так как не проходит в интервал от τ_1 до $2\tau_1$.

Из сказанного следует, что в режиме прямоугольного импульса трассовая зависимость обратного сигнала от плоскости на расстоянии z_1 (см. рис. 2) определяется выражением

$$N(\tau; 2\tau) \sim I_\pi(z_1)t_2 = C(z_1\varphi^2(z_1))^{-1}, \text{ где } t_2 = 2z_1/c. \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой произведение аппаратной функции на расстояние z . Отметим, что t_2 обозначает длительность части лазерного импульса, прошедшего в интервал $(\tau; 2\tau)$. Такую коррекцию будем называть линейной.

При $z \gg l$ число фотоотсчетов $N(\tau; 2\tau) \sim z^{-1}$. Для этого слоя рассеянная назад интенсивность будет линейно увеличиваться из-за того, что большая часть импульса проникает в строб. С другой стороны эта интенсивность будет убывать по квадратичному

закону. Следовательно, обратный сигнал будет убывать как z^{-1} . Для импульсного лидара рассеянная назад интенсивность убывает с дистанцией как z^{-2} .

В режиме нефелометра эффективность использования лазерного излучения может быть существенно выше, чем для обычного импульсного лидара, поскольку длительность лазерного импульса равна длительности интервала включения приемника (строба). Следует отметить особенности выбора для частоты включений нефелометра. Основной трудностью является регистрация в одном стробе лазерного излучения от предыдущих импульсов. Отметим необходимость формирования фонового строба. Этот строб содержит в себе собственный шум приемника, фоновую засветку и вклад от предыдущих лазерных импульсов. Следовательно, режим работы нефелометра должен включать в себя измерения фона.

Режим включения нефелометра будет следующим:

1*. Интервал времени $(0; \tau)$: в момент $t = 0$ включается лазерный импульс в виде прямоугольника шириной $\Delta t = \tau$

2. Интервал времени $(\tau; 2\tau)$: в момент $t = \tau$ включается приемник (основной строб).

3. Интервал времени $(2\tau; 3\tau)$: нефелометр находится в ждущем режиме τ . В это время импульс распространяется внутри строба.

Примечание: Этот интервал может быть увеличен, тогда с одной стороны уменьшится вклад от других стробов, с другой стороны уменьшится эффективность использования лазерного излучения.

4. Интервал времени $(3\tau; 4\tau)$: в момент $t = 3\tau$ включается приемник (фоновый строб).

5. Цикл 1 – 4 повторяется.

*Примечание. Другие режимы коррекции будут отличаться только видом модуляции лазерного импульса. Для каждого типа модуляции пункты (2 – 5) сохраняются.

Предложенная циклограмма характеризуется максимальной частотой включений лазера $\nu = 1/4\tau$. Особенностью указанной циклограммы, является наличие интервала 3τ между началом лазерного импульса и следующим основным стробом. Такой же интервал между лазерным импульсом и первым фоновым стробом. Таким образом в основном стробе регистрируются импульсы с задержкой $\tau, 3\tau, 6\tau, 9\tau$, и т. д. относительно начала лазерного импульса. В фоновом стробе регистрируются импульсы с задержкой $3\tau, 6\tau, 9\tau$, и т. д. относительно начала лазерного импульса. Можно показать, что если вклад в основной строб со стороны предшествующего лазерного импульса не превышает величину на уровне 10% от уровня обратного сигнала в основном стробе, то от всех предшествующих лазерных импульсов вклады суммируются и не превышают 20%.

Ранее был рассмотрен случай линейно убывающего обратного сигнала. В этом режиме трассовая зависимость обратного сигнала определяется как [1]

$$N(\tau; 2\tau) \sim C(\varphi^2(z_l))^{-1}. \quad (3)$$

Эта зависимость представляет собой произведение аппаратной функции (1) на z^2 . Такой режим нефелометра обратного рассеяния будем называть режимом с квадратичной коррекцией обратного сигнала. Приемник включался после окончания лазерного импульса. Этот режим нефелометра будет отличаться от предыдущего тем, что в П.1 в момент $t = 0$ включается лазерный импульс в виде прямоугольного треугольника с линейным убыванием интенсивности для интервала времени $(0; \tau)$. Все остальные пункты циклограммы эквивалентны. Сигнал обратного рассеяния корректируется на квадрат расстояния и для достаточно длинных трасс практически не зависит от расстояния.

Отметим, что в режиме лидара в П.1 интервал времени $(0; \tau)$: в момент $t = 0$ включается лазерный импульс очень малой длительности $\Delta t \ll \tau$. В режиме лидара нет коррекции обратного сигнала. Аппаратная функция для лидара упругого рассеяния определяется выражением (1). Отметим так же, что этот режим может быть реализован с пространственным разрешением из без него. В отсутствии пространственного разрешения

режим лидара может быть использован для нормировки обратного сигнала, полученного в режимах нефелометра. С пространственным разрешением режим лидара можно использовать для поиска локальных рассеивающих слоев вдоль трассы зондирования.

При последовательном использовании всех 3-х режимов частота цикла ν уменьшается в 3 раза и составляет $1/12\tau$. В дальнейшем предполагаем полный режим работы нефелометра с частотой $\nu = 1/12\tau$.

КАЛИБРОВКА

Определим аналог локальной калибровки (ЛК) для ИС [5, 6]. Для реализации калибровки по определению аппаратной функции могут быть использованы три режима нефелометра. В первом случае используем режим прямоугольного импульса и режим лидара. Обозначим, через N_L (Lidar) суммарное количество сигнальных фотоотсчетов от рассеивающей поверхности в режиме лидара. Через N_{rc} (rectangle) обозначим соответствующее количество фотоотсчетов в режиме нефелометра с прямоугольной формой импульса. Тогда аналогом локальной калибровки является трассовая зависимость отношения N_{rc}/N_L . Это зависимость пропорциональна расстоянию до рассеивающей поверхности z .

Во втором случае обозначим, через N_{tr} (triangle) суммарное количество сигнальных фотоотсчетов от рассеивающей поверхности в режиме нефелометра с треугольной формой импульса. Тогда являющееся аналогом локальной калибровки отношение N_{tr}/N_{rc} так же будет пропорционально расстоянию до рассеивающей поверхности z . Зависимость отношения обратных сигналов от расстояния относится к разновидности локальной калибровки для коаксиальной схемы с ИС. Отметим, что указанная выше зависимость линейная. Следовательно, достаточно определить значения N_{tr}/N_{rc} для N_{rc}/N_L для 2-х расстояний. Это свойство является преимуществом комбинации указанных режимов нефелометра. Экспериментальная реализация указанной ЛК не представляет существенных трудностей, так как во время измерений не требуется сохранения угла между плоскостью рассеивающей поверхности и оптической осью пучка.

При зондировании протяженной среды отношениям сигналов N_{tr}/N_{rc} и N_{rc}/N_L из ЛК практически всегда можно сопоставить дистанцию z_{lc} , зависящую от коэффициента экстинкции α . Параметр z_{lc} можно связать с глубиной зондирования внутри среды.

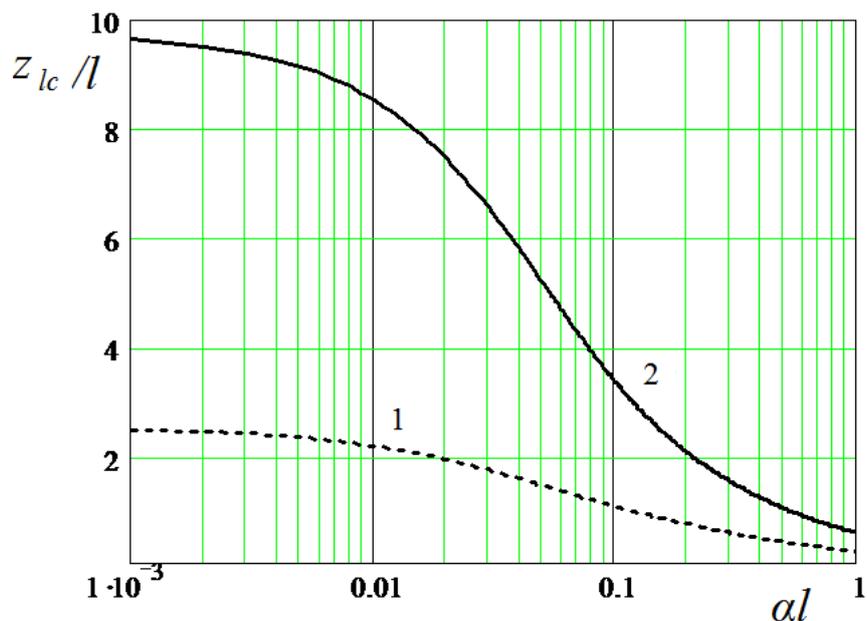


Рис. 3. Зависимость параметра глубины зондирования z_{lc}/l от безразмерного КЭ αl . 1 – линейная коррекция обратного сигнала, лидарный режим, 2 – квадратичная и линейная коррекция обратного сигнала

На рис. 3 (1, 2) представлены результаты моделирования зависимости z_{lc}/l от αl для длины строга $\tau = 60l/c$ (длина зондируемой трассы $L = 30l$). Из рис. 3 следует, что для 1 зависимости $N_{rc}/N_L(\alpha l=0) = (z/l)=2,6$ ($\sim L/11$) для 2 зависимости $N_{tr}/N_{rc}(\alpha l = 0) = (z/l) = 9,8$ ($\sim L/3$). Эти значения можно интерпретировать как максимальную глубину зондирования в рассеивающей среде. Отсюда следует, что режим работы нефелометра с использованием импульсов лазера треугольной и прямоугольной формы является предпочтительным, поскольку максимальная глубина зондирования составляет $9,8l$ ($\sim L/3$). Это расстояние существенно превышает длину l ближней зоны лидара. Для второго режима работы максимальная глубина зондирования сравнима с длиной ближней зоны ($N_{rc}/N_L(\alpha l = 0) < 2,6l$). Отметим, что расстояния сравнимые с длиной ближней зоны технически сложны для калибровки. На дальних расстояниях поле зрения и угловой размер пучка сформированы и не испытывают больших осцилляций. Следовательно, точность определения КЭ для квадратичной коррекции больше, чем для нефелометра с линейной коррекцией обратного сигнала.

Из рис. 3 (1) выберем верхнюю границу КЭ $\alpha l < 0,1$. Тогда значение глубины зондирования $z_{lc} > l$. Для $\alpha l > 0,1$ глубина зондирования z_{lc} находится в ближней зоне нефелометра ($z_{lc} < l$). Оптимальное значение КЭ при определим как

$$z_{opt} = \frac{z_{lc}(\alpha l = 0) + z_{lc}(\alpha l = 0,1)}{2}. \quad (4)$$

По графику находим при $\tau = 60l/c$ $z_{opt} \approx 1,9l$, что соответствует оптимальной для измерений оптической тоще $\alpha_{opt}l = 0,03$ ($\alpha_{opt} = L^{-1}$). Глубина зондирования z_{lc} для $\tau = 60l/c$ меняется от $2,6l$ до $1,8l$. Следовательно, индикатором дальности зондирования можно выбрать z_{lc} . В общем случае значение параметра z_{lc} дает информацию о степени однородности трассы и КЭ.

Для имеющегося макета лидара [7] с $l = 14$ м найдем оптимальное значение КЭ $\alpha_{opt} \approx 0,03/14 = 0,002 \text{ м}^{-1}$ при $L = 30l$, что соответствует оптической толще $0,8$ ($\alpha_{opt}L = 0,8$). С увеличением длины строга $\tau = 120l/c$ чувствительность нефелометра увеличивается $\alpha_{opt}l = 0,02$ ($\alpha_{opt}L = 1,2$). Следовательно для оценок в качестве оптимального значения КЭ можно всегда выбирать $\alpha_{opt} = L^{-1}$. Таким образом длину строга τ можно связать с оптимальным значением КЭ как $\tau \sim 2/c\alpha$ ($\alpha L \sim 1$). Одновременным увеличением мощности диодного лазера и длины строга можно настраивать нефелометр на измерения КЭ в заданном диапазоне КЭ.

К недостаткам такого метода следует отнести то, что для ИС невозможно измерить поперечные искажения пучка и поля зрения вдоль зондируемой трассы. Из-за этих искажений может измениться сигнал обратного рассеяния.

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИДАРНОГО ОТНОШЕНИЯ

Для измерения КЭ и КОР требуется ввести индикаторы, зависящие от степени однородности среды вдоль трассы зондирования. Из рис. 3 следует, что для заданного значения параметра αl можно найти 2 значения $z_{lc}(N_{tr}/N_{rc})$, $z_{lc}(N_{rc}/N_L)$. Пусть $\alpha l = 0,01$. Тогда $z_{lc}(N_{tr}/N_{rc}) = 8,3l$, и $z_{lc}(N_{rc}/N_L) = 2,3l$. По этим значениям для однородной трассы можно найти значение КЭ. Если атмосфера неоднородная или ограничена поверхностью рассеивающего объекта, то указанным значениям z_{lc} нельзя сопоставить КЭ.

Режим с квадратичной коррекцией обратного сигнала удобен для калибровки по КОР. В этой задаче достаточно определить сигнал от рассеивающей поверхности из ближней зоны. В этой зоне сигнал может быть на несколько порядков меньше чем для импульсного лидара. Тогда возможны ситуации, когда не надо использовать аттенюаторы для совмещения динамического диапазона сигналов от поверхности и из атмосферы.

ПРИМЕР

Для имеющегося макета лидара [7] энергии сигнала, рассеянной назад с 30 метров, от рассеивающей поверхности с коэффициентом отражения $\rho_{\pi} = 0,3 \text{ стр}^{-1}$ соответствует 120 фотоотсчета. Соответствующая величина от слоя атмосферы шириной 75 м составляет 0,02 фотоотсчета. Следовательно, ослабление сигнала должно составлять порядка 10^3 . Для нефелометра с квадратичной коррекцией обратного сигнала на расстоянии 10 м сигнал от рассеивающей поверхности может быть в 100 раз меньше, чем для расстояния 100 м. Соответствующий аттенюатор должен давать дополнительное ослабление зондирующего пучка в 10 раз. Для указанного примера обратный сигнал на расстояниях десяти метров даст вероятность фотоотсчета на уровне 0,2. Таким образом, калибровку лидара по КОР можно производить без аттенюаторов.

В общем случае калибровка СОП при наличии локальной калибровки осуществляется посредством перфорированных экранов [6]. Результаты калибровки по КОР могут быть применены для остальных режимов работы, поскольку зондирующая система реализована в одной геометрии.

Для измерений КОР и интерпретации данных зондирования требуется определить индикатор отсутствия поперечных искажений пучка. Для этого необходим дополнительный приемный канал с другим геометрическим форм фактором по отношению к основному приемному каналу. Ранее была описана двухпозиционная схема (ДПС) [5], часть которой представляет собой ИС, а дополнительный приемный канал имеет ту же геометрию что и основной канал (без излучающего источника), но его оптическая ось параллельно смещена на некоторое расстояние d . Пусть $d = 2a$. Этой геометрии соответствует касание полей зрения на входной апертуре нефелометра. При этом передаточная функция пропускания отверстия должна соответствовать максимальному пропусканию по всей площади отверстия. Тогда на выходе из канала передатчика зондирующий пучок начнет практически сразу перекрываться с полем зрения дополнительного приемного канала. Каналы оптически изолированы горизонтальной темной перегородкой [8].

Пусть для ДПС произведена локальная калибровка. Такой калибровкой является трассовая зависимость отношения энергии сигналов для дополнительного и основного приемных каналов. При зондировании атмосферы этому отношению можно сопоставить глубину зондирования z_{lc} внутри слоя L . Параметр z_{lc} при $\alpha l = 0$ определяется только геометрией ДПС нефелометра и не зависит от оптических свойств среды. При $\alpha l > 0$ из локальной калибровки получаем новое значение глубины зондирования, которому можно сопоставить КЭ. Если найденное значение КЭ равно значению КЭ, полученному в режиме нефелометра, то поперечными искажениями можно пренебречь. В противном случае этот параметр указывает на существование искажений пучка.

Использование указанных индикаторов может позволить производить измерения лидарного отношения КОР/КЭ с использованием сигнала упругого рассеяния от всех слоев, расположенных вдоль заданной трассы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены три режима работы нефелометра упругого рассеяния. В импульсном режиме (режим лидара) обратный сигнал не корректируется на дистанцию. В режиме с использованием прямоугольного импульса обратный сигнал корректируется на дистанцию линейно. При использовании треугольной формы импульса обратный сигнал корректируется на дистанцию квадратично. Показано, что при измерении КЭ могут быть одновременно использованы режим линейной и импульсной коррекции, а так же режим квадратичной и линейной коррекции. Аналог локальной калибровки в обоих случаях имеет наиболее простой вид, так как трассовая зависимость обратного сигнала зависит линейно от дистанции. Для измерения КЭ преимуществом обладает режим с использованием квадратичной и линейной коррекции. В режиме с квадратичной коррекцией аппаратная функция представляет собой

медленно меняющуюся функцию. Это приводит к тому, что вклады в обратный сигнал от различных слоев отличаются незначительно и следовательно, измерения КЭ осуществляются с большей точностью. В указанных измерениях принципиальными вопросами являются однородность рассеивающей среды и отсутствие искажений обратного сигнала. Показано, что индикатором однородности среды является одновременное использование режимов нефелометра. Измерение КЭ в указанных режимах должны совпадать. Для контроля ГФФ ИС должна быть дополнена дополнительным приемным каналом с другим ГФФ по отношению к зондирующему пучку. По отношению сигналов, измеряемых дополнительным и основным приемными каналами можно определять искажения ГФФ. При квадратичной коррекции обратного сигнала возможны измерения обратного сигнала от калиброванной рассеивающей поверхности с минимальным использованием аттенуаторов. Одновременное измерение КОР и КЭ позволяет применять нефелометр с квадратичной и линейной коррекцией аппаратной функции для определения лидарного отношения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арумов Г. П., Бухарин А. В., Блих Ю. М.** Сравнение режимов работы лидара-нефелометра для измерения коэффициента обратного рассеяния / Прикладная физика и прикладная механика, Труды МФТИ, 2014. Т. 6. № 3. С. 114-121.
2. **Суворина А. С., Веселовский И. А., Коренский М. Ю., Колготин А. В.** Использование линейных оценок для определения интегральных параметров интегральных параметров атмосферного аэрозоля из спектральных измерений его оптической толщи / Оптика атмосферы и океана, 2014. Т. 27. № 3. С. 182-191.
3. **Арумов Г.П., Бухарин А. В., Ерохин Н. С.** Анализ метода восстановления размеров и концентрации аэрозоля по данным дистанционного зондирования рассеивающих сред двухпозиционными системами / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2004. В. 1. С. 324-329.
4. **Measures R. M.** Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications, Wiley, N. Y., 1983. 912 p.
5. **Bukharin A. V.** Method for measurement of beam lateral distortions with two-position sensing schemes / Physics of Vibrations, 2001. V. 9. № 4. P. 246 - 255.
6. **Bukharin A. V.** Experimental Validation of the Scenario of the Object Microstructure Determination Using a Two-Position Lidar System: a Screen with Random Transmittance Modulation / Physics of Wave Phenomena, 2007. V. 15. № 3. P. 191-200.
7. **Першин С. М., Бухарин А. В., Линкин В. М., Макаров В. С.** Калибровка аэрозольного лидара с квантовым счетчиком и регистрация атмосферных неоднородностей / Оптика атмосферы и океана, 1994. Т. 7. № 4. С. 538-547.
8. **Бухарин А. В.** Особенность распространения поляризованного света через оптическую систему с проводящей пластиной / Нелинейный мир, 2013. Т. 11. № 8. С. 577 – 582.

G. P. Arumov, A. V. Bukharin, A. V. Turin

*Space Research Institute, 117997, Russian Academy of Science, Russia, 117997, Moscow,
Profsoyuznaya ul. 81/32, E-mail: tumbul@iki.rssi.ru*

NEPHELOMETR MODES USING HARDWARE CORRECTION OF THE RETURN SIGNAL FOR THE PROBLEM OF DETERMINING THE LIDAR RATIO ON THE OPEN TRACE

Nephelometer with pulsed laser operation mode (LIDAR), a rectangular shape with a mode (linear correction feedback signal) with a triangular pulse mode (inverse quadratic correction signal) is

considered. For these modes, there are two possibilities for the local analog calibration. In the first case, a ratio of the signals in the linear and quadratic correction of signal. The second ratio of the signals in linear correction mode and lidar mode. In this case, the trace of the ratio backscattering signal is linear in both cases. The advantage of the first mode compared to the second mode in the measurement of extinction coefficient. When calibrating the measuring backscatter coefficient has the advantage of the quadratic correction because it requires minimal use of attenuating filters. Proposed indicator of the degree of homogeneity of the trace. This indicator is the simultaneous measurement of the value of extinction coefficient using these two modes nephelometer. For inhomogeneous atmosphere measured values of extinction coefficients will be different. To measure the geometric distortion of the probe beam should use an additional receiving channel. The ratio of return signals on the secondary and main receiver channels in the presence of a local calibration is an indicator of the distortion of the probe beam. Nephelometer mode is effective tool for determining the lidar ratio because of simultaneous measurement of the backscatter coefficient and extinction coefficient.

ONE-POSITION SCHEME, COAXIAL SCHEME, REMOTE SENSING, BACKSCATTER COEFFICIENT, EXTINCTION COEFFICIENT, LASER DIODE, GEOMETRICAL FORM FACTOR, NEPHELOMETR, LIDAR, SCATTERING, CALIBRATION, ATTENUATOR