

Нефелометр обратного рассеяния, использующий прямоугольный фрагмент лазерного импульса

Г.П. Арумов, А.В. Бухарин, А.В. Тюрин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: tumbul@iki.rssi.ru

Представлена коаксиальная схема зондирования, которая является основой для импульсного лидара и нефелометра. В идеальной схеме зондирования угловой размер пучка и поля зрения равны для любого расстояния. Режим нефелометра использует фрагмент прямоугольного лазерного импульса. Время регистрации фотоотсчетов приемником (строб) равно длительности лазерного импульса. Зависимость отношения обратного сигнала в режиме нефелометра к полному сигналу обратного рассеяния для режима лидара линейно зависит от расстояния. Это дает возможность определить глубину зондирования в рассеивающей среде. Эффективность использования лазерного излучения в режиме нефелометра значительно выше, чем для импульсного лидара. Это позволяет выбрать практически безопасный для глаз лазер для дистанционного зондирования атмосферы на высотах от нескольких сотен метров до нескольких километров. Калибровка с помощью стандартной рассеивающей поверхности может быть сделана на расстояниях, сравнимых с длиной ближней зоны лидара с минимальным использованием аттенуаторов. Оптимальное значение для коэффициента экстинкции α_{opt} может быть выбрано с точки зрения длительности лазерного импульса τ как $\alpha_{opt} = 2/c\tau$, где c – скорость света. Моделировалась регистрация в основной строб фотонных импульсов от предыдущих лазерных импульсов. Показано, что вклад в сигнал обратного рассеяния от предыдущих лазерных импульсов составляет менее 20% от сигнала обратного рассеяния для основного лазерного импульса.

Ключевые слова: однопозиционная схема, коаксиальная схема, дистанционное зондирование, коэффициент обратного рассеяния, коэффициент экстинкции, диодный лазер, геометрический форм-фактор, нефелометр, лидар, рассеяние, калибровка, аттенуатор

Одобрена к печати: 20.05.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-198-206

Введение

Для задач зондирования аэрокосмическими системами актуальными являются вопросы достоверности восстановленных параметров атмосферы. Такие параметры определяют посредством моделирования обратного сигнала из атмосферы. Форма обратного сигнала описывается основным лидарным уравнением. Это уравнение содержит в себе одновременно трассовые зависимости коэффициентов обратного рассеяния (КОР) и экстинкции (КЭ) (Measures, 1983). Наиболее распространенным алгоритмом определения трассовой зависимости этих коэффициентов является метод Клетта (Klett, 1981). Граничными условиями для применения алгоритма являются значения указанных коэффициентов в конце трассы вблизи поверхности Земли. Перспективным инструментом для измерения этих коэффициентов на относительно коротких трассах являются наземные компактные лидары обратного рассеяния. Абсолютная калибровка любого лидара связана со значительными техническими трудностями (Першин и др., 1994). На коротких трассах аппаратная функция сильно изменяется и требуется значительное ослабление обратного сигнала. Используемые для этих целей аттенуаторы могут исказить геометрический форм-фактор приемного и передающего каналов. На больших дистанциях возникает проблема получения обратного сигнала от стандартной рассеивающей поверхности. Если такой сигнал получен, то из аппаратной функции определяются калибровочные коэффициенты на всей трассе. Одним из подходов для калибровки по стандартной поверхности на коротких трассах

является использование такой модуляции излучения лазера, при которой обратный сигнал монотонно возрастает с расстоянием до рассеивающей поверхности или остается постоянным. Прогресс в разработке диодных лазеров делает возможным создание импульсного и других режимов модуляции выходного излучения на базе диодного лазера. Ранее был рассмотрен нефелометр, в котором интенсивность лазерного излучения линейно уменьшалась со временем (Арумов и др., 2014). После окончания лазерного импульса включался приемник. Особенностью этого режима является монотонное нарастание сигнала от рассеивающей поверхности. Это существенно упрощает способ калибровки лидара. В отличие от сканирующих систем, использующих, как правило, излучение Солнца, предложенный режим нефелометра дает КОР и КЭ для относительно коротких трасс (от нескольких десятков до нескольких сотен метров). Эти значения могут быть выбраны в качестве граничных условий в алгоритме по методу Клетта. Использование диодных лазеров делает возможным реализацию режимов нефелометра и лидара внутри одного прибора.

Геометрия лидара обратного рассеяния

Будем рассматривать лидар с коаксиальной схемой зондирования (Арумов и др., 2004). В этой схеме поле зрения основного приемного канала совпадает с зондирующим пучком. Идеальной является схема (ИС), в которой 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 (Measures, 1983) 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 (Bukharin, 2001):

$$P(t) = \text{const}(z^2 \varphi^2(z))^{-1} \Big|_{z=ct/2}. \quad (1)$$

Здесь $\varphi(z)$ – угловой размер пучка (поля зрения) на расстоянии z от входной апертуры лидара, $P(t)$ – мощность обратного сигнала для ИС в момент времени t , z – расстояние до объекта (плоскость, слой). Наличием атмосферы в диапазоне от θ 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.

В приближении ГО для $\varphi(z)$ справедливо выражение:

$$\varphi(z) = a(I^{-1} + z^{-1}). \quad (2)$$

Здесь l – продольный размер ИС, a – радиус входной апертуры приемного канала. На малых расстояниях угловой размер пучка $\varphi(z)$, наблюдаемый из плоскости входной апертуры приемного канала, стремится к бесконечности, на больших расстояниях $\varphi(z)=a/l$.

Аппаратной функцией ИС является трассовая зависимость сигнала до рассеивающей поверхности. При этом во время измерений угол между оптической осью пучка и нормалью к поверхности не должен меняться. В общем случае, как было упомянуто во Введении, такие измерения представляют собой значительные технические трудности.

Режим нефелометра обратного рассеяния

Рассмотрим режим работы ИС в качестве нефелометра на *рис. 1*. Вначале 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 строба $L=c\tau/2$ может существенно превышать масштаб убывания сигнала обратного рассеяния с расстоянием l ($L \gg l$). В дальнейшем используем приближение $L=c\tau/2 \gg l$.

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 в 2 раза увеличится и площадь прямоугольника (см. прямоугольник от τ до $\tau+t_3$ и n_2 по вертикали). Рассеянный назад сигнал 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 $2\tau_1$.

Трассовая зависимость обратного сигнала от рассеивающей поверхности, выраженная через количество сигнальных фотоотсчетов в интервале от τ до 2τ , определяется выражением:

$$N(\tau \leq t \leq 2\tau) = \text{const}(z\varphi^2(z))^{-1}. \quad (3)$$

Здесь $\varphi(z)$ определяется из (2). Из (3) и (2) следует, что $N(\tau \leq t \leq 2\tau) \sim z$ при $z \ll l$. В режиме нефелометра после выключения лазерного импульса обратный сигнал будет регистрироваться от слоя, находящегося в непосредственной близости от лидара. Амплитуда интенсивности излучения, рассеянного назад этим слоем, будет много меньше максимальной. Появляется возможность работы зондирующего средства практически без мертвой зоны, следовательно для режима нефелометра возможны ситуации, когда не обязательно использовать аттенюаторы для совмещения динамического диапазона сигналов от поверхности

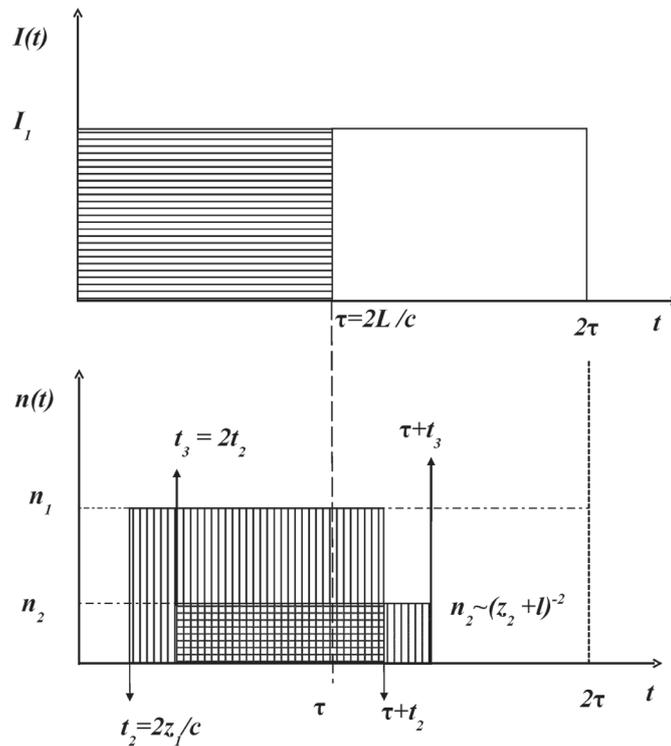


Рис. 1. Режим работы нефелометра обратного рассеяния с прямоугольной формой импульса

и из атмосферы. В режиме лидара при $z < l$ обратный сигнал от рассеивающей поверхности на несколько порядков превышает сигнал от слоя атмосферы.

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 режима 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.

Пусть пространственный эквивалент длительности строба $L = 30l$. Это соответствует длительности строба $\tau = 2L/c = 60l/c$. Режим включения нефелометра будет следующим:

1. Интервал времени $(0; \tau)$: в момент $t=0$ включается лазерный импульс.
2. Интервал времени $(\tau; 2\tau)$: в момент $t = \tau$ включается приемник.
3. Интервал времени $(2\tau; 3\tau)$: нефелометр находится в ждущем режиме τ . В это время импульс распространяется внутри строба.

4. Интервал времени (3τ ; 4τ): в момент $t=3\tau$ включается фоновый строб.
5. Цикл 1–4 повторяется.

Предложенная циклограмма характеризуется частотой включений лазера $\nu=1/4\tau$. Особенностью указанной циклограммы является то, что интервал между началом лазерного импульса и вторым основным стробом составляет 3τ . Такой же интервал между лазерным импульсом и первым фоновым стробом. Таким образом, в основном стробе регистрируются импульсы с задержкой τ , 3τ , 6τ , 9τ и т. д. относительно начала лазерного импульса. В фоновом стробе регистрируются импульсы с задержкой 3τ , 6τ , 9τ и т. д. относительно начала лазерного импульса. Слой, от которого отражается в основной строб предшествующий основному лазерный импульс, находится в три раза дальше слоя, от которого отражается основной лазерный импульс. Для однородной атмосферы квадратичное убывание обратного сигнала с расстоянием дает оценку вклада от этого слоя на уровне 10% от уровня обратного сигнала в основном стробе. Для остальных лазерных импульсов, предшествующих основному, фотоотсчеты убывают по квадратичному закону обратно пропорционально $(3\tau)^2$, $(6\tau)^2$, $(9\tau)^2$ и т. д. Суммарный вклад в основной строб для этих импульсов (Арумов и др., 2015) находится на уровне 20%. Для применимости метода Клетта обратный сигнал от приземного слоя должен быть зарегистрирован одновременно, как наземными, так и аэрокосмическими системами зондирования. Этот случай соответствует отсутствию аномальных рассеивающих слоев вдоль трассы зондирования. Можно ожидать, что для такой атмосферы вклад со стороны предшествующих лазерных импульсов не будет существенно превышать указанные 20%. Другие случаи можно выявлять посредством переключения режима нефелометра в режим импульсного лидара.

Пример. Сделаем оценки для имеющегося макета лидара (Першин и др., 1994). Поле зрения приемного канала φ_0 составляет 1 мрад. Диаметр апертуры $a=14$ мм. Параметр l определим как $a/\varphi_0=14$ м.

Для имеющегося макета лидара максимальная мощность в импульсе составляет 10 Вт, длительность лазерного импульса – 100 нс. Частота следования импульсов – 2,5 кГц. Средняя мощность лазерного излучения – 2,5 мВт. Эффективность использования энергии лазера составляет $2,5 \cdot 10^{-3}/10=2,5 \cdot 10^{-4}$ ($2,5 \cdot 10^{-2}\%$). Такой эффективности соответствует работа импульсного лидара.

Для сопоставления режимов работы лидара и нефелометра рассмотрим непрерывный режим диодного лазера с мощностью 10 мВт. Поскольку интервал между включениями лазера в 4 раза больше длительности лазерного импульса, то эффективность использования лазерного излучения составит $1/4=0,25$ (25%) и будет выше, чем для режима импульсного лидара, в сотни раз. Средняя мощность диодного лазера во время измерений составляет приблизительно 2,5 мВт и равна средней мощности излучения, используемого в макете импульсного лазера. Для имеющегося макета лидара геометрический форм-фактор приемного и передающего каналов составляет 0,1 из-за того, что угловые параметры зондирующего пучка составляют 10×1 мрад, поле зрения прием-

ного канала – 1 мрад. Это означает, что за один импульс лазера в поле зрения приемного канала находится менее 10% от энергии пучка, или 100 нДж.

Пространственная длительность строба в режиме нефелометра составляет $L=30l$. Это соответствует стробу длительностью $\tau=2,8$ мкс. и длине зондируемой трассы $L=420$ м. Максимальная частота включений лазера ν может составлять до $\nu=1/4\tau=90$ кГц. Для непрерывного излучения 10 мВт в поле зрения приемного канала содержится энергия ~28 нДж (2,8 мкс X 10 мВт). Эта величина в три раза меньше энергии для импульсного лидара. Основными факторами повышения чувствительности нефелометра являются геометрический форм-фактор и мощность пучка на выходе лазера. Для существующих диодных лазеров с управлением током уровень выходной мощности составляет до 1 Вт, а размер излучающей области составляет до 50 мкм. При использовании объективов угловой размер может быть согласован с геометрией поля зрения и составлять 1 мрад. Таким образом, существует возможность повышения чувствительности нефелометра в сотни раз.

Отметим, что даже несмотря на неоптимальную настройку, имеющийся макет лидара обратного рассеяния позволяет измерять обратный сигнал из однородной атмосферы с КОР 10^{-6} (м стр) $^{-1}$ при длине трассы до топографического объекта 3 км.

Калибровка

Для реализации калибровки по определению аппаратной функции могут быть использованы как режим нефелометра, так и режим импульсного лидара. Определим аналог локальной калибровки (ЛК) для ИС (Bukharin, 2001). Обозначим через N_1 суммарное количество сигнальных фотоотсчетов от рассеивающей поверхности в режиме лидара. Через N_2 обозначим соответствующее количество фотоотсчетов в режиме нефелометра. Тогда отношение N_2/N_1 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_2/N_1 для 2-х расстояний. Это свойство является основным преимуществом режима нефелометра, использующего фрагмент лазерного импульса постоянной интенсивности. Экспериментальная реализация указанной ЛК для ИС не представляет существенных трудностей, так как во время измерений не требуется сохранения угла между плоскостью рассеивающей поверхности и оптической осью пучка.

Отношению сигналов N_2/N_1 из ЛК практически всегда можно сопоставить дистанцию z_{lc} , зависящую от коэффициента экстинкции α . Параметр z_{lc} можно связать с глубиной зондирования внутри среды.

На рис. 2 представлены результаты моделирования зависимости z_{lc}/l от αl при $L=10l$, $30l$, $60l$. Моделирование в приближении ГО дает следующее: для длины строба $\tau=60l/c$ в пренебрежении ослаблением $N_2/N_1=(z/l)=2,6$ при $\tau=120l/c$ $z_{lc}=3,2l$, при $\tau=20l/c$ $z_{lc}=1,6l$.

Отсюда следует необходимость выбора строба достаточно большой длительности τ , чтобы $z_{lc} > l$.

Оптимальный для измерения коэффициент экстинкции α определим через безразмерный параметр αl : $z(\alpha l) > l$. Из рис. 2 видно, что оптимальному диапазону КЭ соответствует ($\alpha l < 0,1$). При этом значение глубины зондирования $z_{lc} > l$. Для $\alpha l > 0,1$ глубина зондирования z_{lc} находится в ближней зоне нефелометра ($z_{lc} < l$). Оптимальные значения глубины зондирования и КЭ определим из выражения:

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

Из (4) находим: при $\tau = 60l/c$ (см. график 2 на рис. 2) $z_{opt} \approx 1,9l$, что соответствует оптимальной для измерений оптической тоще $\alpha_{opt} l = 0,03$. 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 коэффициенте ослабления. В случае $L = 10l$ (см. график 1 на рис. 2) глубина зондирования z_{lc} имеет минимальный диапазон, незначительно превышающий длину ближней зоны l .

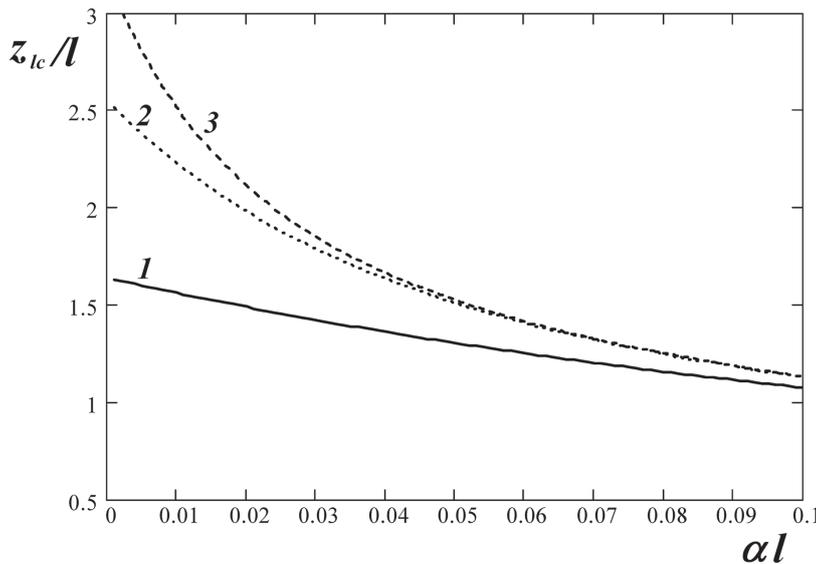


Рис. 2. Зависимость глубины зондирования z_{lc}/l , от безразмерного КЭ αl при длине зондируемой трассы $L = 10l$ (1), $30l$ (2), $60l$ (3), где l – продольный размер ИС

Для примера, указанного выше, при $l = 14$ м находим значение КЭ: $\alpha_{opt} \approx 0,03/14 = 0,002 \text{ м}^{-1}$, что соответствует оптической толще $0,8$ ($\alpha_{opt} L = 0,8$). С увеличением длины строба $\tau = 120l/c$ (см. график 3 на рис. 2) чувствительность нефелометра увеличивается $\alpha_{opt} l = 0,02$ ($\alpha_{opt} L = 1,2$), следовательно в качестве оптимального значения КЭ можно выбрать $\alpha_{opt} = L^{-1}$. Таким образом, длину строба τ можно связать с оптимальным значением КЭ как $\alpha_{opt} \approx 2/c\tau$. Одновременным увеличением мощности диодного лазера и длины строба можно настраивать нефелометр на измерения КЭ в заданном диапазоне.

К недостаткам такого метода следует отнести то, что параметр z_{lc} при $al > 0,1$ находится рядом с ближней зоной. Это обусловлено большим вкладом в обратный сигнал со стороны ближних слоев зондируемого участка атмосферы.

Заключение

Рассмотрен принцип работы лидара-нефелометра с ИС, который характеризуется существенно большей эффективностью использования лазерного пучка по сравнению с режимом импульсного лидара. В режиме нефелометра упрощается калибровка по измерению аппаратной функции. К преимуществам режима нефелометра можно отнести линейную зависимость для локальной калибровки. По этой зависимости определяют параметр глубины зондирования в рассеивающей среде. Посредством этого индикатора можно настраивать зондирующий инструмент на измерения КЭ в заданном диапазоне. Для рассмотренной ИС оптимальный КЭ можно оценить как $\alpha_{opt} \approx 2/c\tau$. Особенностью работы нефелометра является регистрация фотоотсчетов в основном стробе от предыдущих лазерных импульсов. Показано, что в однородной атмосфере для частоты включений лазера $\nu = 1/4\tau$, где τ – длительность строба (лазерного импульса), вклад в основной строб со стороны предыдущих лазерных импульсов находится в пределах 20% от количества сигнальных фотоотсчетов для основного строба. В режиме нефелометра существует возможность введения параметра глубины зондирования, который может быть выбран как индикатор однородности атмосферы. Тогда появляется возможность определения эффективного значения КОР и КЭ для относительно коротких трасс (от нескольких десятков до нескольких сотен метров). Эти коэффициенты могут использоваться как граничные условия для обработки по методу Клетта сигналов обратного рассеяния, измеренных аэрокосмическими системами зондирования.

Литература

1. Арумов Г.П., Бухарин А.В., Блих Ю.М. Сравнение режимов работы лидара-нефелометра для измерения коэффициента обратного рассеяния // Труды МФТИ. 2014. Т. 6. № 3. С. 114–121.
2. 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. Вып. 1. С. 324–329.
3. Арумов Г.П., Бухарин А.В., Тюрин А.В. Режим нефелометра обратного рассеяния в задаче определения лидарного отношения на открытых трассах зондирования с использованием аппаратной коррекции обратного сигнала // Тринадцатая Международная научно-техническая конференция “Оптические методы исследования потоков”. Москва. МЭИ. 29 июня – 03 июля 2015 г. Сборник статей. С. 231–239.
4. 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.
5. Bukharin A.V. Method for measurement of beam lateral distortions with two-position sensing schemes // Physics of Vibrations. 2001. Vol. 9. No. 4. P. 246–255.
6. Measures R.M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. New York: Wiley, 1983. P. 912
7. Klett D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. Vol. 20. No. 2. P. 211–220.

Backscatter nephelometer using a rectangular fragment of the laser pulse

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

Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia

E-mail: tumbul@iki.rssi.ru

A coaxial sensing scheme as a basis for of a pulse lidar and nephelometer is presented. In an ideal sensing scheme the angular dimensions of the beam and the field of view are equal for any distance. The nephelometer mode uses a fragment of a rectangular laser pulse. Registration time of counts for the receiver (gate) is equal to the duration of the laser pulse. Dependence of the ratio of return signal in nephelometer mode to the full backscatter signal for lidar mode is linearly dependent on the distance. This makes it possible to determine the depth sensing in the scattering medium. The effectiveness of the use of laser light in the mode of nephelometer is significantly higher than for pulsed lidar. This enables to choose almost safe-eye laser for remote sensing atmosphere from of several hundred meters to several kilometers. Calibration using the standard scattering surface can be made at distances comparable to the length of the near zone of the lidar with minimal use of attenuators. Optimal value for the extinction coefficient α_{opt} can be selected in terms of the laser pulse duration τ as the $\alpha_{opt} = 2/c\tau$, where c – speed of light. Registration in the main gate of photon counts from the previous laser pulses was simulated. It is shown that contribution to the backscatter signal from the previous laser pulses is less than 20% of the backscatter signal for the main laser pulse.

Keywords: one-position scheme, coaxial scheme, remote sensing, backscatter coefficient, extinction coefficient, laser diode, geometrical form factor, nephelometer, lidar, scattering, calibration, attenuator

Accepted: 20.05.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-198-206

References

1. Arumov G.P., Bukharin A.V., Blich Yu.M., Sravnenie rezhimov raboty lidara-nefelometra dlya izmereniya koeffitsienta obratnogo rasseyaniya (Comparison of modes of lidar-nephelometer to measure the backscattering coefficient), *Trudy MFTI*, 2014, Vol. 6, No. 3, pp. 114–121.
2. Arumov G.P., Bukharin A.V., Erokhin N.S., Analiz metoda vosstanovleniya razmerov i kontsentratsii aerolya po dannym distantsionnogo zondirovaniya rasseivayushchikh sred dvukhpozitsionnymi sistemami (Restoration of size and concentration of aerosol scattering medium of remote sensing data obtained by the two-position systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, pp. 324–329.
3. Arumov G.P., Bukharin A.V., Tyurin A.V., Rezhim nefelometra obratnogo rasseyaniya v zadache opredeleniya lidarnogo otnosheniya na otkrytykh trassakh zondirovaniya s ispol'zovaniem apparatnoi korrektsii obratnogo signala (Nephelometr modes using hardware correction of the return signal for the problem of determining the lidar ratio on the open trace), *13 Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Opticheskie metody issledovaniya potokov"* (13th Int. Conf. "Optical Methods of Flow Investigation"), Proc. Conf., Moscow: MPEI, July 2015, pp. 231–239.
4. Pershin S.M., Bukharin A.V., Linkin V.M., Makarov V.S., Kalibrovka aerol'nogo lidara s kvantovym schetchikom i registratsiya atmosferykh neodnorodnosti (Calibration of an Aerosol Lidar Operating in Photon Counting Regime and Detection of Atmosphere Inhomogeneities), *Optika atmosfery i okeana*, 1994, Vol. 7, No. 4, pp. 538–547.
5. Bukharin A.V., Method for measurement of beam lateral distortions with two-position sensing schemes, *Physics of Vibrations*, 2001, Vol. 9, No. 4, pp. 246–255.
6. Measures R.M., *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*, New York: Wiley, 1983, 912 p.
7. Klett D., Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Appl. Opt.*, 1981, Vol. 20, No. 2, pp. 211–220.