

Моделирование лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от неоднородного капельного облака

В.В. Брюханова, С.М. Григорьев

Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36,
E-mail: leo@elefot.tsu.ru

В статье обсуждается аппроксимация высотного хода коэффициента рассеяния капельного облака. Рассчитаны энергетические характеристики лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния с использованием данной аппроксимации.

In this paper the approximation of vertical profile of the scattering coefficient of the droplet cloud is discussed. Power characteristics of lidar return in double scattering approach with use of this approximation are calculated.

Широкое использование лидаров для решения многих научных и прикладных задач оптики атмосферы обусловлено их высокой чувствительностью при обнаружении малых аэрозольных примесей в атмосфере, дистанционностью и большой оперативностью получения данных. Однако, несмотря на многолетнюю практику использования лидаров для достаточно большого круга задач, до сих пор не решены многие технические и методические вопросы. К числу таких задач относится лазерное зондирование оптически плотных аэрозольных образований.

В большинстве работ интерпретация данных лидарных экспериментов основывается на решении уравнения лазерного зондирования (УЛЗ), связывающем мощность лидарного сигнала с параметрами приемо–передающей системы лидара и характеристиками исследуемой среды

$$P^{(1)}\left(r = \frac{ct}{2}\right) = \frac{P_0 A c \tau_u}{8\pi r^2} \sigma(r) x(\pi, r) e^{-2\tau(r)}, \quad (1)$$

где P_0 – мощность посылаемого в атмосферу излучения, A – площадь приёмной апертуры лидара, c – скорость света в воздухе, τ_u – длительность импульса излучения лазера, $x(\pi, r)$ – индикатриса рассеяния в направлении π , $\sigma(r)$ – коэффициент рассеяния, $\tau(r)$ – оптическая толщина на участке трассы от 0 до r [1]. Как видно из приведенного выражения, на уровень лидарного сигнала влияет пространственное распределение коэффициента рассеяния и индикатрисы обратного рассеяния. Данное выражение получено в приближении однократного рассеяния, которое справедливо для сред с малой оптической толщиной ($\tau \leq 1$), например, слабых дымок. При зондировании оптически плотных образований (облаков или антропогенного аэрозоля) вклад многократного рассеяния в лидарный сигнал может быть, не только сравним, но и превышать уровень однократного рассеяния.

В работе [2] описан эксперимент по лазерному зондированию слоисто–кучевых облаков лидаром с изменяемым углом поля зрения (рис. 1).

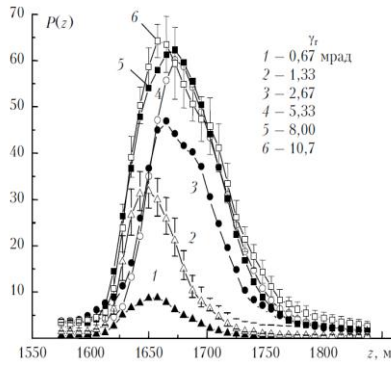


Рис. 1. Усредненные профили лидарных сигналов от слоисто-кучевого облака при различных углах поля зрения приема

Как видно, с увеличением угла поля зрения лидара мощность лидарного сигнала возрастает. Т.к. мощность лидарного сигнала однократного рассеяния не зависит от угла поля зрения приемной системы лидара, нетрудно предположить, что увеличение мощности лидарного сигнала обусловлено изменением уровня многократного рассеяния.

Задача учета вклада многократного рассеяния в лидарный сигнал в общем виде не решена. Во многих практически значимых случаях лидарный сигнал может быть достаточно точно описан в приближении двукратного рассеяния [3].

Общее выражение для мощности двукратного рассеяния $P^{(2)}(r)$ имеет вид [1]

$$P^{(2)}(r) = \frac{P_0 A c \tau_u}{16\pi} e^{-2\tau(r)} [I_1 + I_2], \quad (2)$$

где

$$I_1 = \int_0^{\frac{\theta_0}{2}} \int_0^r \frac{\sigma(z)\sigma(z_1)}{R(z, \gamma, r)} x(z, \gamma) x(z_1, \pi - \gamma) \sin \gamma dz d\gamma,$$

$$I_2 = \int_{\frac{\theta_0}{2}}^{\pi} \int_{z'(\gamma)}^r \frac{\sigma(z)\sigma(z_1)}{R(z, \gamma, r)} x(z, \gamma) x(z_1, \pi - \gamma) \sin \gamma dz d\gamma,$$

$$R(z, \gamma, r) = r^2 - (2r - z)z \sin^2 \frac{\gamma}{2},$$

$$z_1 = z + \frac{r(r - z) \cos \gamma}{r - z \sin^2 \frac{\gamma}{2}},$$

$$z'(\gamma) = r \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{4} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} \right). \quad (3)$$

θ_0 – угол поля зрения приёмной системы.

Из выражения (2) видно, что мощность лидарного сигнала двукратного рассеяния зависит от угла поля зрения приёмной антенны лидара, от глубины проникновения зондирующего импульса в облако и от характеристик среды: индикатрисы рассеяния в диапазоне углов от 0° до 180° и высотного хода (профиля) коэффициента рассеяния.

Мощность полного лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния можно записать следующим образом:

$$P(r) = P^{(1)}(r) + P^{(2)}(r) = P^{(1)}(r) [1 + \delta(r)], \quad (4)$$

где

$$\delta(r) = \frac{P^{(2)}(r)}{P^{(1)}(r)} -$$

относительный вклад мощности двукратного рассеяния в лидарный сигнал, который с учетом (1) и (2) принимает вид

$$\delta(r) = \frac{r^2 [I_1 + I_2]}{2\sigma_{\pi}(r)}. \quad (5)$$

При численном моделировании лидарного сигнала аэрозольная среда по трассе зондирования, как правило, считается однородной. В реальности же аэрозольная среда, конечно же, однородной не является. На высотный ход коэффициента рассеяния сильное влияние оказывает неоднородность атмосферы. Рис. 2 [4] иллюстрирует большую изменчивость коэффициента рассеяния аэрозольной атмосферы.

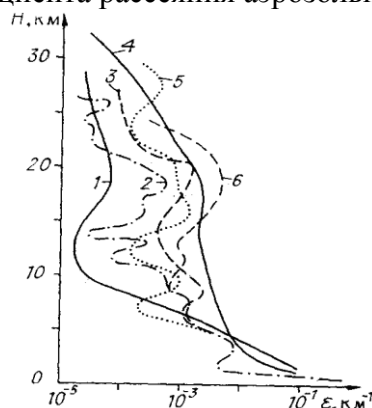


Рис. 2. Вертикальные профили коэффициента рассеяния для $\lambda \sim 0,5$ мкм.

На рис. 3. приведены результаты восстановления коэффициента ослабления по лидарным данным авторами [3].

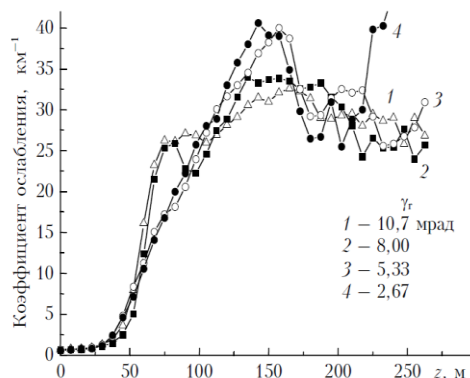


Рис. 3. Профили коэффициента ослабления, восстановленные из лидарных измерений в течение одного цикла при четырех различных углах поля зрения θ

Начало отсчета по оси Oz совмещено с положением ближней границы облака. Из рисунка 10 видно, что на участке от ближней границы облака до глубины 70–80 м коэффициент ослабления монотонно возрастает до уровня около 25 км^{-1} , при этом на малых глубинах для углов поля зрения 5,33 и 2,67 мрад зависимость коэффициента ослабления от глубины более плавная, чем для углов 10,7 и 8,00 мрад. Это определяется тем, что при меньших углах поля зрения вклад многократного рассеяния

в лидарный сигнал меньше. При дальнейшем углублении в облако разброс данных существенен. Как отмечают сами авторы статьи, возможно, это определяется ошибкой при обработке данных.

Пренебрегая рассеянием до облака и считая индикатрису рассеяния не зависящей от координаты (это возможно, если считать распределение частиц по размерам в облаке постоянным), мощность лидарного сигнала, обусловленного двукратным рассеянием можно записать в следующем виде:

$$P^2(r) = \frac{P_0 A c \tau_u}{16\pi} e^{-2\tau(r)} \left[\int_0^{\theta_0/2} \int_H^r \frac{\sigma(z)\sigma(z')}{R(z,\gamma,r)} \chi(\gamma)\chi(\pi-\gamma) \sin \gamma dz d\gamma + \int_{\gamma_H}^{\pi} \int_{z'(\gamma)}^r \frac{\sigma(z)\sigma(z')}{R(z,\gamma,r)} \chi(\gamma)\chi(\pi-\gamma) \sin \gamma dz d\gamma \right], \quad (6)$$

где γ_H – угол рассеяния, при котором $z'(\gamma) = H$. Значение этого угла нетрудно определить из выражения (6), используя (3):

$$\gamma_H = 2 \operatorname{arccctg} \left(\frac{r-H}{r \operatorname{tg} \theta_0/4} \right).$$

Конечно, часто наблюдается подоблачная дымка, и распределение частиц в облаке может носить пространственный характер, но и такая стратификация атмосферы возможна, и поэтому может быть рассмотрена.

Приведенные на рис. 3 данные могут быть аппроксимированы (рис.4) функцией вида

$$\sigma(z) = a_1 + \frac{(a_2 - a_1)}{1 + (z/a_3)^{a_4}},$$

где коэффициенты аппроксимации для данного профиля принимают значения $a_1=0.03103$; $a_2=7.48531 \cdot 10^{-4}$; $a_3=66.09715$; $a_4=5.15348$.

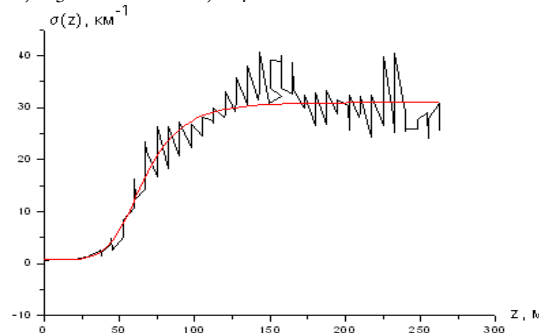


Рис. 4. Аппроксимации профиля коэффициента рассеяния

Мы рассчитали лидарный сигнал двукратного рассеяния от капельного облака (модели облаков С1, С2, С3) на основе выражения (4) с использованием аппроксимации профиля коэффициента рассеяния (7). Рис. 5 иллюстрирует зависимость мощности лидарного сигнала однократного рассеяния от глубины проникновения импульса в облако при $\lambda=450$ нм и угле поля зрения $\theta_0=2,67$ мрад. Для облаков С1 и С2 ход кривых совпадает, мощность лидарного сигнала однократного рассеяния от облака С3 чуть меньше. Возможно это объясняется тем, что модальный радиус частиц в облаке С3 меньше близких по значению модальных радиусов частиц в облаках С1 и С2.

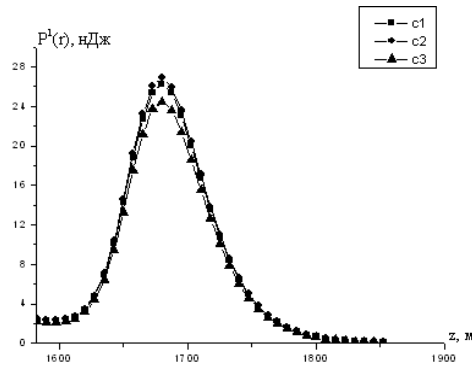
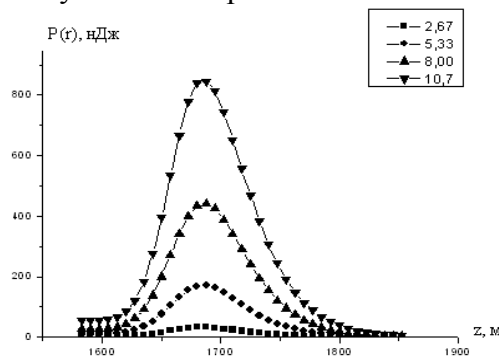


Рис. 5. Зависимость мощности лидарного сигнала однократного рассеяния от глубины проникновения зондирующего импульса в облако на $\lambda=450$ нм при $\theta_0=2,67$ мрад

На рис. 6 приведена зависимость мощности лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от глубины проникновения зондирующего импульса в облако С1 на $\lambda=450$ нм при различных углах поля зрения.



а)

б)

Рис. 7. Зависимость мощности лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от глубины проникновения зондирующего импульса в облако С1

Как видно, с увеличением угла поля зрения приемной системы лидара мощность лидарного сигнала двукратного рассеяния возрастает, причем это возрастание имеет нелинейный характер (угол поля зрения возрастает в 1,5–2 раза, а мощность принимаемого сигнала в большее количество раз).

Мощность лидарного сигнала двукратного рассеяния при проникновении зондирующего импульса в облако на 250 м практически сравнима с величиной лидарного сигнала однократного рассеяния при $\theta_0=2,67$ мрад. При увеличении угла поля зрения вклад двукратного рассеяния в лидарный сигнал нелинейно возрастает.

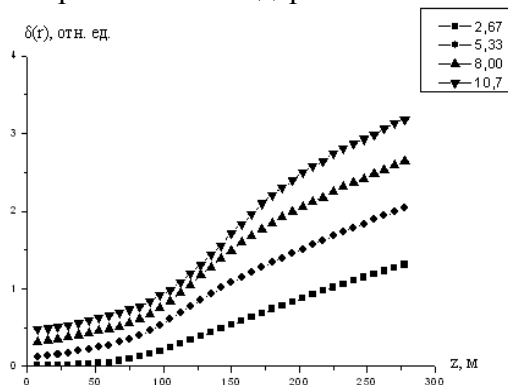


Рис. 8. Зависимость относительного вклада двукратного рассеяния в лидарный сигнал от глубины проникновения зондирующего импульса в облако С1

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ: ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (ГК № 16.518.11.7048), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 14.740.11.1145) и РФФИ (грант № 11-05-01200).

Литература

1. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Н.: Наука, 1986. – 185 с.
2. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Н.: Наука, 1987. – 173 с.
3. Веретенников В.В., Абрамочкин А.И. Определение оптических и микроструктурных характеристик капельных облаков при лазерном зондировании с учетом многократного рассеяния // Оптика атмосферы и океана, 22, № 7, 2009. С. 671–680.
4. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Современные проблемы атмосферной оптики. Т.4. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 253с.