

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОЗОЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ АТМОСФЕРЫ ИЗ ЭХО-ИМПУЛЬСА ЛИДАРА БЛИЖНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ*

А.А. Лисенко¹, В.С. Шаманаев¹, Е.В. Шестериков¹,
М.Г. Креков¹, О.Ю. Емельянов²

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Предложен метод восстановления профиля коэффициента рассеяния атмосферы вдоль трассы зондирования из эхо-импульса лидара ближнего радиуса действия, который реализован в вычислительном алгоритме, позволяющем восстанавливать распределение коэффициента рассеяния вдоль атмосферной трассы зондирования с использованием дополнительной информации о коэффициенте обратного рассеяния в опорной точке. Эффективность метода подтверждена результатами проведенного замкнутого численного эксперимента.

Ключевые слова: *лидар круиз-контроля ближнего радиуса действия, учет влияния аэрозолей атмосферы на работу лидара, восстановление профиля коэффициента аэрозольного рассеяния, замкнутый численный эксперимент.*

Введение

Модернизированный авторами алгоритм интегрального накопления лидарных сигналов был разработан еще в 80-х гг. XX в. [1], но до сих пор не утратил своей актуальности. Большинство задач, связанных с распространением лазерного излучения в системах связи, дистанционного зондирования, обнаружения целей, в которых имеет место сложная геометрия и многокомпонентная рассеивающая среда и где требуется восстановление оптических параметров атмосферы, может решаться именно с применением описанного в статье метода. Однако алгоритм интегрального накопления, реализующий данный метод, был разработан для задач вертикального зондирования атмосферы [2], а актуальная сегодня задача применения лидаров для управления беспилотными автомобилями требует восстановления оптических параметров атмосферы для горизонтальных трасс нижней атмосферы, со сложными и быстро меняющимися условиями. Поэтому данный алгоритм был адаптирован авторами для восстановления профиля коэффициента рассеяния атмосферы вдоль трассы зондирования из эхо-импульса лидара ближнего радиуса действия.

Современные лазерные оптико-электронные устройства обнаружения целей и определения дальности (лидары) широко используются в высокотехнологичных роботизированных системах машинного зрения, в том числе в системах адаптивного круиз-контроля для управления беспилотными транспортными средствами [3–5]. При этом лидары работают в условиях, когда импульс излучения, отраженный от цели – объекта, поступает ослабленным и видоизмененным в результате влияния атмосферы, а также оптических и геометрических свойств отражающей поверхности объекта. Учет взаимодействия импульса излучения с атмосферой и отражающей поверхностью цели обуславливает выполнение важнейших требований к лидару круиз-контроля, таких как дальность действия и помехоустойчивость, а также позволяет получить одновременно необходимую информацию об оптических свойствах атмосферы и свойствах объекта.

В реальных атмосферных условиях аэрозоли, такие как дымка, туман, осадки, пыль, вызывают ослабление энергии лазерного импульса, что приводит к снижению отношения сигнал/шум, а также являются причиной ложного срабатывания лидара по эхо-сигналу от атмосферного аэрозоля. Проблема обратного рассеяния является наиболее серьезной при использовании лидаров ближнего радиуса действия (100–300 м). Особенно интенсивные эхо-сигналы от атмосферы возникают в условиях плотного тумана, интенсивных осадков, дыма, сильной запыленности и других помех [6, 7]. Сигналы, вызванные помехой обратного рассеяния, могут привести к ложному срабатыванию целеуказателя (если они превысят пороговый уровень) и, как следствие, к неправильной оценке положения объекта. В связи с этим возникает необходимость идентификации сигнала рас-

* Работа выполнена в рамках государственного задания П.12.1.2 ИОА СО РАН (рег. № проекта АААА-А17-117021310152-4).

сеяния на атмосферном аэрозоле и разработки программных средств его удаления из временной реализации эхо-импульса лидара круиз-контроля с учетом различия в характере сигналов, отраженных от цели и от атмосферного аэрозоля. Это является одной из проблем, ограничивающих эффективность применения лидаров ближнего радиуса действия. Другой не менее актуальной задачей, стоящей перед разработчиками лидаров круиз-контроля, является извлечение полезной информации из части сигнала, обусловленной рассеянием на атмосферном аэрозоле, а именно профиля коэффициента аэрозольного рассеяния по трассе распространения и коэффициента пропускания атмосферы, и в перспективе, с использованием мультиспектральных лидаров, типа аэрозоля и функции распределения частиц аэрозоля по размерам. Решение данной задачи требуется при восстановлении отражательной способности поверхности цели из лидарного эхо-импульса.

В данной работе предложен метод восстановления профиля коэффициента аэрозольного рассеяния атмосферы из эхо-импульса лидара круиз-контроля ближнего радиуса действия, который реализован авторами в вычислительном алгоритме. Функция пропускания атмосферного канала восстанавливалась по измерениям в опорной точке коэффициента аэрозольного рассеяния. Оценка коэффициентов рассеяния и поглощения в капельных аэрозолях, таких как дымки и туманы [8–10], производилась с единых позиций теории Ми [11] с учетом связи коэффициента обратного рассеяния и коэффициента ослабления лидарного сигнала. Алгоритм, реализующий предложенный метод, базируется на математической модели эхо-импульса лидара ближнего радиуса действия, представленной в следующем разделе.

Математическая модель эхо-импульса лидара ближнего радиуса действия

Мощность эхо-импульса лидара ближнего радиуса действия содержит три составляющих:

$$P_{\text{pulse}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{ob}}(R) + P_{\text{bg}}. \quad (1)$$

Здесь первое слагаемое, P_{atm} , описывает эхо-импульс обратного рассеяния в атмосфере молекулами воздуха и аэрозолями; в условиях автомобильного движения в городе это индустриальная дымка, туман, дождь, снег. Второе слагаемое, P_{ob} , характеризует пиковую мощность и форму эхо-импульса, отраженного от наклонной поверхности цели с учетом диффузного характера ее отражающей способности (по Ламберту) и угла наклона. Третье слагаемое, P_{bg} , учитывает мощность фонового сигнала, отраженного от поверхности цели и поступающего на объектив приемной оптики лидара. Их можно записать следующим образом:

$$P_{\text{atm}}(R) = \frac{k_{\text{opt}} P_0 G(R) c \tau_0 \pi D_{\text{res}}^2 \beta_{\pi}(R) T_{\text{atm}}^2(R)}{8R^2}, \quad (2)$$

$$P_{\text{ob}}(R) = k_{\text{opt}} P_0 \frac{\rho_{\text{ob}}}{\pi} \cos \theta G(R) \frac{\pi D_{\text{res}}^2}{4} T_{\text{atm}}^2(z_i) \int_{-\varphi_s}^{\varphi_s} \exp \left[-\frac{k_{\text{opt}}}{\tau_0^2} \left(\frac{2R}{c} - \frac{2z_i}{c} - \frac{\tau_0}{2} \right) - \frac{2\text{tg}^2(\psi)}{\Phi_2^s} \right] \frac{1}{z_i^2} d\psi, \quad (3)$$

$$z_i = \frac{R_{\text{ob}} \cos \delta}{\cos(\theta + \psi + \delta)},$$

$$P_{\text{bg}} = k_{\text{opt}} \rho_{\text{ob}} \frac{B_{\text{bg}}}{\pi} \cos(\delta + \theta) \Omega_{\text{res}} \Delta \lambda \frac{\pi D_{\text{res}}}{4} T_{\text{atm}}, \quad (4)$$

$$T_{\text{atm}} = \exp[-\beta_{\text{sc}}(R)R], \quad (5)$$

где R – расстояние до объекта; k_{opt} – коэффициент пропускания оптики; P_0 – пиковая мощность импульса; $G(R)$ – геометрическая функция лидара; c – скорость света; τ_0 – длительность импульса; D_{res} – диаметр приемной оптики; $\beta_{\pi}(R)$ – коэффициент обратного рассеяния; T_{atm} – прозрачность атмосферы; $\beta_{\text{sc}}(R)$ – коэффициент аэрозольного рассеяния; ρ_{ob} – коэффициент отражения поверхности объекта; θ – угол между осью лазерного луча и линией горизонта; R_{ob} – расстояние до объекта; φ_s – половинный угол расходимости лазерного луча; ψ – угол между осью лазерного луча и линией, проведенной к произвольной точке на объекте; δ – угол наклона объекта; B_{bg} – спектральная яркость солнечного излучения у земной поверхности; Ω_{res} – телесный угол, под которым детектор «видит» элемент поверхности цели. Данная математическая модель лидарного эхо-

импульса использовалась для вычисления профиля аэрозольного коэффициента рассеяния атмосферы.

Восстановление коэффициента рассеяния аэрозоля методом интегрального накопления с опорной точкой

Анализ методов расчета профиля коэффициента рассеяния аэрозоля β_{sc} на атмосферной трассе выявил ряд особенностей, включая необходимость дополнительных данных [1], получение которых невозможно в ограниченное время из-за требования оперативности работы данной лидарной системы. Нами была разработана модификация метода интегрального накопления для расчета профиля коэффициента рассеяния сигнала лидара ближнего радиуса действия атмосферным аэрозолем. В этой модификации предполагается, что начальный участок трассы до исследуемого аэрозольного слоя является «чистой» атмосферой, назовем его опорной точкой (в случае, если имеются два аэрозольных слоя на трассе, начальный участок берется до первого из них). Тогда для этого участка $\beta_{sc}(R) = \text{const}$. При этом профиль коэффициента аэрозольного рассеяния вычисляется по формуле

$$\beta_{sc}(R) = \begin{cases} \frac{S(R)}{\frac{S(R_{r,p})}{\beta_{sc}(R_{r,p})} - 2 \int_{R_{r,p}}^R S(R) dR}, & R > R_{r,p}, \\ \frac{1}{2} \frac{d}{dr} [\ln(S(R))], & R \leq R_{r,p}. \end{cases} \quad (6)$$

При расчете данным методом не требуются контактные измерения или теоретические оценки для получения априорных сведений. Преимущество данного метода перед методом асимптотического сигнала, расчет по которому также выполняется только с помощью дистанционных измерений, состоит в том, что отсутствует необходимость выполнять экстраполяцию S -функции, а решение лидарного уравнения на участке трассы зондирования вплоть до конца исследуемого образования не зависит от характера сигнала на последующих участках. Так, при работе автомобильных лидаров, когда излучение лазерного источника отражается от поверхности цели, стенки здания или другого объекта, это приводит к появлению на конечном интервале лидарного сигнала эхо-импульса и делает невозможным расчет по методу асимптотического сигнала. Операция интегрирования более устойчива к аппаратным погрешностям, чем операция дифференцирования при использовании метода логарифмической производной. Основной трудностью в реализации данного метода является сложность автоматизации процедуры нахождения опорной точки $R_{r,p}$ и снижение точности измерения $\beta_{sc}(R_{r,p})$ методом логарифмической производной при малой величине сигнала и, как следствие, малом отношении сигнал/шум (SNR).

Для примера смоделируем восстановление профиля коэффициента рассеяния аэрозоля и прозрачности на трассе длиной 150 м. Атмосфера задана моделью дымки Дейрменджана [11] с метеорологической дальностью видимости $S_m = 20$ км. При этом на трассе находится слой тумана толщиной 15 м, заданный супергауссовым распределением с показателем степени 10 и $S_m = 100$ м. Модельный профиль коэффициента рассеяния β_{sc} и обратного рассеяния β_π показан на рис. 1. Расчет профиля коэффициента аэрозольного ослабления по трассе, который для лидара ближнего радиуса действия равен коэффициенту аэрозольного рассеяния, поскольку поглощением излучения здесь можно пренебречь, производится по формуле (6). Вычислительная процедура содержит следующие основные этапы.

Этап 1. Получаем из исходного эхо-импульса лидара S -функцию и делим ее на геометрический фактор $G(R)$, который зависит от конструктивных особенностей лидара, таких как расходимость источника, поля зрения приемника, размеры излучающей и приемной апертур и базы – расстояния между ними, а также от оптических параметров объекта. Лидар ближнего радиуса действия имел энергию в импульсе $E_{\text{pulse}} = 200$ нДж, $\tau_0 = 4$ нс, $\rho_{\text{ob}} = 0.2$, $k_{\text{opt}} = 0.8$, $\phi_s = 1$ мрад, $\phi_{\text{res}} = 14$ мрад, $\Delta\lambda = 10$ нм, $B_{\text{bg}} = 1$ Вт $\cdot$ ср $^{-1}$ ·мкм $^{-1}$. Цель находилась на расстоянии $R_{\text{ob}} = 30$ м, атмосфера задавалась дымкой с метеорологической дальностью видимости $S_m = 20$ км и слоем тумана с $S_m = 100$ м протяженностью 15 м. Геометрический фактор такого лидара показан на рис. 2.

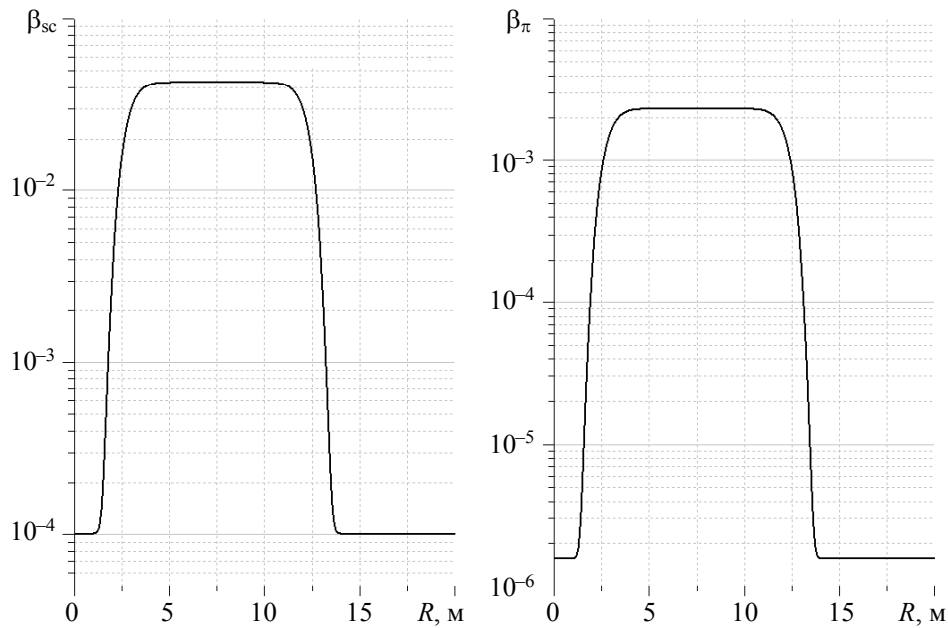
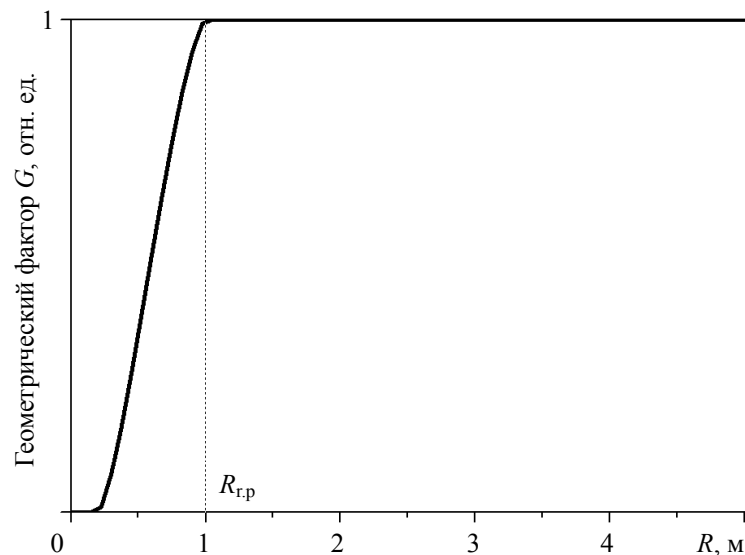
Рис. 1. Профиль коэффициента рассеяния β_{sc} и обратного рассеяния β_{π} на трассе

Рис. 2. Геометрический фактор лидача

Этап 2. Выделяем из исходного эхо-импульса атмосферную составляющую (ниже мы рассмотрим критерий, по которому можно различить эхо-импульсы от атмосферы и цели) и выбираем опорную точку $R_{г.р}$ или участок длиной несколько метров, на котором методом логарифмической производной вычисляем коэффициент рассеяния $\beta_{sc}(R_{г.р})$. Опорный участок выбираем в окрестности максимума эхо-импульса, исходя из соображения максимума отношения сигнал/шум (рис. 3). Отметим, что $\max_1$ возникает на рис. 3 за счет рассеяния импульса в начале трассы в дымке до появления слоя тумана, а $\max_2$ – за счет рассеяния импульса в тумане. Определять $\beta_{sc}(R_{г.р})$ можно, откладывая участок и от первого максимума, но лучше его выбирать в окрестности второго максимума, где отношение сигнал/шум больше. Выбранный опорный участок можно подвергнуть процедуре подгонки (fitting). В данном случае использовалась процедура Power Fit. Далее вычисляем β_{sc}^i на выбранном участке в каждой точке, предполагая, что атмосфера на этом участке однородна, и используя соотношение $\beta_{cs}^i = -\ln[S(i)/S(i-1)]/2\Delta R$, находим среднее по выбранному количеству точек значение $\beta_{sc} = \frac{1}{N} \sum_i^N \beta_{cs}^i$.

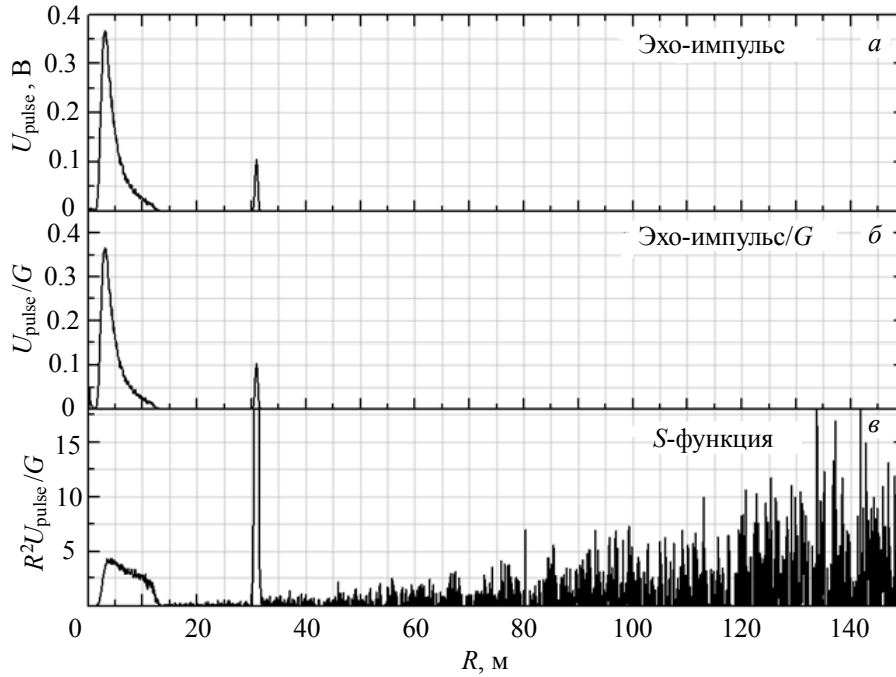


Рис. 3. Эхо-импульс лидара (а), эхо-импульс, скорректированный на геометрический фактор, (б) и S -функция (в). Цель на расстоянии $R_{ob} = 30$ м, атмосфера задана дымкой с метеорологической дальностью видимости $S_m = 20$ км и слоем тумана $S_m = 100$ м протяженностью 15 м при $E_{pulse} = 200$ нДж, $\tau_0 = 4$ нс, $\rho_{ob} = 0.2$, $k_{opt} = 0.8$, $\varphi_s = 1$ мрад, $\varphi_{res} = 14$ мрад, $\Delta\lambda = 10$ нм, $B_{bg} = 1$ Вт⁻¹·ср⁻¹·мкм⁻¹

Этап 3. Вычисляем профиль коэффициента ослабления и пропускание атмосферы на трассе, используя следующие соотношения:

$$\beta_{sc}(R) = \frac{S(R)}{\frac{S(R_{r,p})}{\beta_{sc}(R_{r,p})} - 2 \int_{R_{r,p}}^R S(R) dR}, \quad T_{atm} = \exp \left[- \int_0^R \beta_{sc}(R) dR \right]. \quad (7)$$

Результаты восстановления профиля коэффициента аэрозольного рассеяния β_{sc} и прозрачности T_{atm} по формуле (7) с использованием предложенного метода показаны на рис. 3. Исходная прозрачность атмосферы – $T_{atm}^{mod} = 0.66$, вычисленная по восстановленному контуру – $T_{atm}^{rec} = 0.69$, что подтверждает работоспособность и эффективность предложенного алгоритма.

Методика восстановления коэффициента ослабления через определение коэффициента обратного рассеяния в опорной точке

Для восстановления коэффициента обратного рассеяния в опорной точке $\beta_{\pi}^{r,p}$ через вычисление коэффициента рассеяния $\beta_{sc}^{r,p}$ в опорной точке необходимо рассмотреть следующее упрощающее предположение: пусть прозрачность атмосферы на участке трассы до точки полного перехвата излучения лазера полем зрения приемника $T_{atm}^{int} = 1$ (рис. 3, в нашем случае это расстояние $R_{int} = 1$ м, где геометрический фактор $G = 1$). Тогда уравнение для эхо-импульса лидара (2) можно записать следующим образом:

$$P(R) = \frac{C_0 \beta_{\pi}(R)}{R^2}, \quad (8)$$

отсюда легко найти $\beta_{\pi}^{r,p}$:

$$\beta_{\pi}^{r,p} = S(R_{r,p}) / C_0, \quad (9)$$

где C_0 – аппаратная константа; $S(R)$ – S -функция лидара. Далее необходимо определить β_{sc}^{rp} , после чего процедура восстановления профиля коэффициента ослабления и прозрачности на трассе будет аналогична рассмотренной выше, с тем лишь исключением, что для анализа мы должны использовать первый максимум эхо-сигнала обратного рассеяния $\max_1$ (рис. 4), который возникает на дистанции от начала до полного перекрытия лазера и поля зрения приемника (если атмосфера полностью однородна, т.е. нет слоев, как для ситуации на рис. 4, тогда максимум будет один и анализ как по первой методике, так и по второй будет проводиться относительно этого максимума).

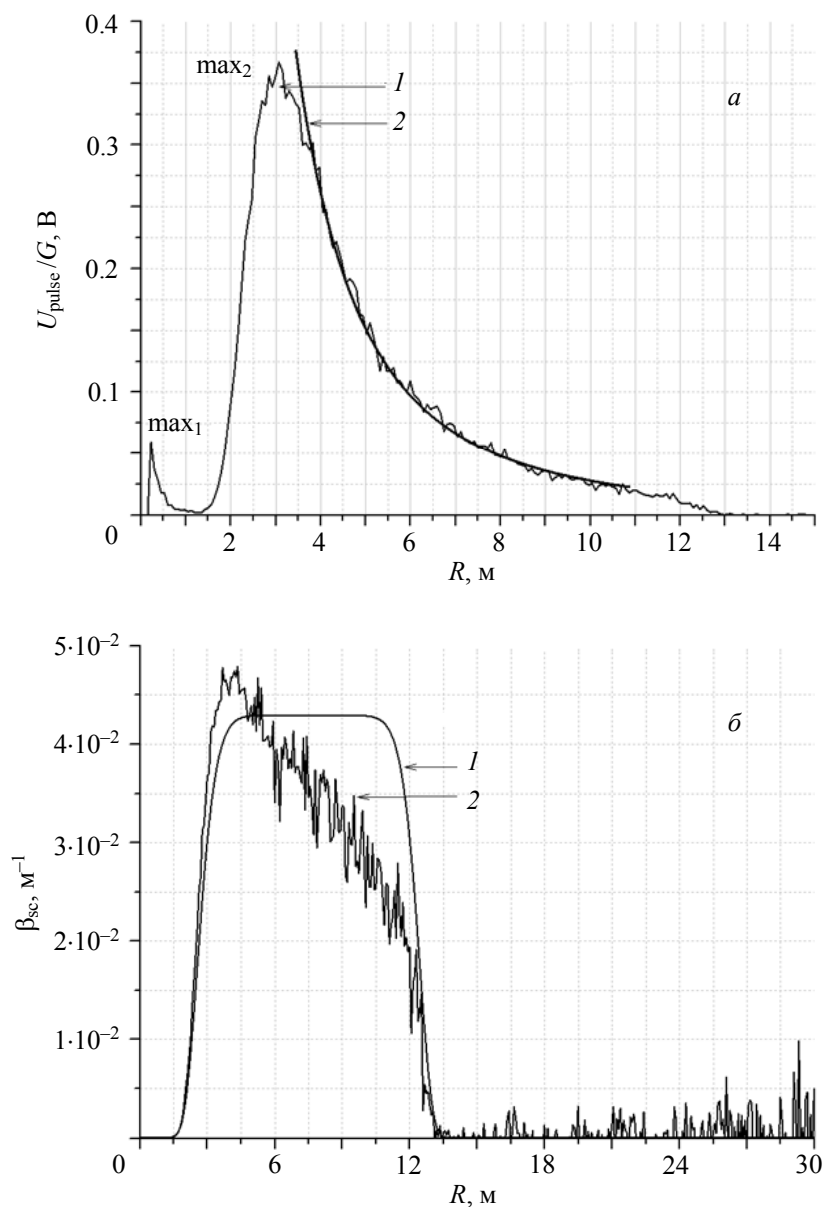


Рис. 4. Выбор опорного участка на эхо-импульсе (кр. 1 – сигнал, кр. 2 – power fit) (а) и восстановленный из эхо-импульса лидара профиль коэффициента аэрозольного ослабления (кр. 1 – модельный профиль, кр. 2 – восстановленный профиль) (б). Цель на расстоянии $R_{ob} = 30$ м, атмосфера задана дымкой с $S_m = 20$ км и слоем тумана с $S_m = 100$ м протяженностью 15 м при $E_{pulse} = 200$ нДж, $\tau_0 = 4$ нс, $\rho_{ob} = 0.2$, $k_{opt} = 0.8$, $\varphi_s = 1$ мрад, $\varphi_{res} = 14$ мрад, $\Delta\lambda = 10$ нм, $B_{bg} = 1 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$

Коэффициент ослабления в опорной точке $\beta_{sc}^{r,p}$ определяется из восстановленного $\beta_{\pi}^{r,p}$ с использованием формулы

$$\beta_{sc} = a\beta_{\pi}^b. \quad (10)$$

Коэффициенты аппроксимации a и b для длины волны 0.905 и 1.55 мкм приведены для тумана и индустриальной дымки [9, 10, 12] в таблице, а связь между коэффициентами ослабления и обратного рассеяния, рассчитанная нами с использованием формул теории Ми [11], показана на рис. 5. Из рисунка видно, что здесь имеется область неопределенности (разрыв значений на графике) в переходной области значений для метеорологической дальности видимости $S_m = 1000$ м (S_m для тумана рассчитывался в диапазоне 50–1000 м, дымки – в диапазоне 1000–30000 м), обусловленная разной микрофизикой тумана и дымки. Этот разрыв значений нуждается в доопределении. Полученные кривые (рис. 5) позволили нам провести аппроксимацию полученных зависимостей, показанную пунктирными кривыми.

Коэффициенты аппроксимации в формуле (4)

Длина волны, мкм	Дымка	Туман
0.905	$a = 0.02287,$ $b = 1$	$a = 19.74,$ $b = 0.9834$
1.55	$a = 43.76,$ $b = 1$	$a = 18.91,$ $b = 0.9691$

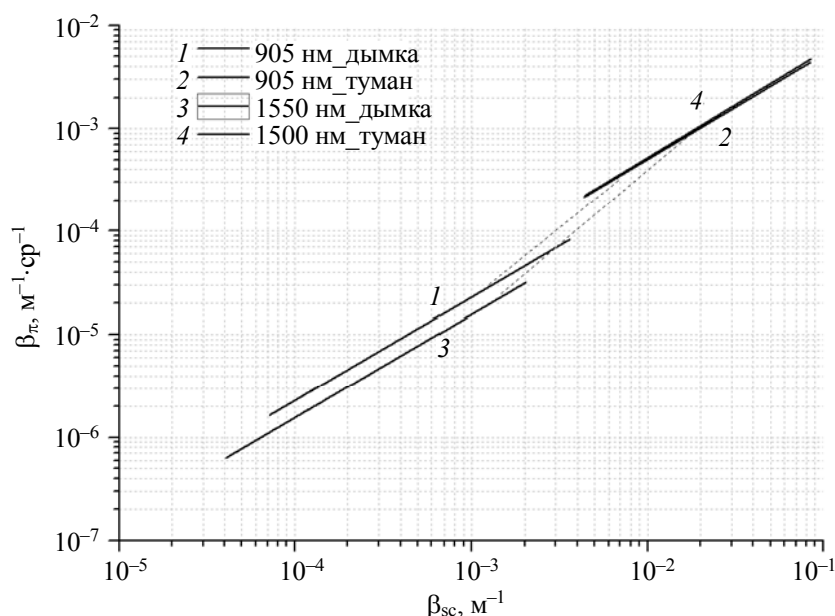


Рис. 5. Аппроксимация теоретических зависимостей коэффициентов ослабления и обратного рассеяния, рассчитанных по формулам теории Ми, для длин волн 905 и 1550 нм (пунктирные линии)

Чтобы оценить эффективность предложенного метода восстановления коэффициента рассеяния аэрозоля методом интегрального накопления с опорной точкой, нами был проведен замкнутый численный эксперимент по определению коэффициента обратного рассеяния в опорной точке из атмосферного эхо-сигнала для дымки с $S_m = 20$ км и слоем тумана протяженностью 20 м на расстоянии 10 м. Эхо-импульс лидара ближнего радиуса действия для такой модели атмосферы, скорректированный на геометрический фактор лидара, показан на рис. 6, а. На рис. 6, б показаны результаты восстановления профиля коэффициента рассеяния β_{sc} и прозрачности атмосферы T_{atm} с использованием предложенного алгоритма. Опорная точка, в которой эхо-импульс достигает первого максимума, равна $R_{r,p} = 0.224$ м, вычисленный из эхо-импульса коэф-

коэффициент обратного рассеяния в опорной точке равен $\beta_{\pi}^{r,p} = 1.97 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (заданное значение составляло $1.58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$), ему соответствует рассчитанный по формуле аппроксимации (9) коэффициент рассеяния в опорной точке $\beta_{sc}^{r,p} = 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ (заданное значение равно $1.014 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$). Исходная прозрачность атмосферы $T_{atm}^{mod} = 0.83$, вычисленная по восстановленному профилю с использованием предложенного метода, составила $T_{atm}^{rec} = 0.78$, что подтверждает работоспособность и эффективность предложенного авторами метода.

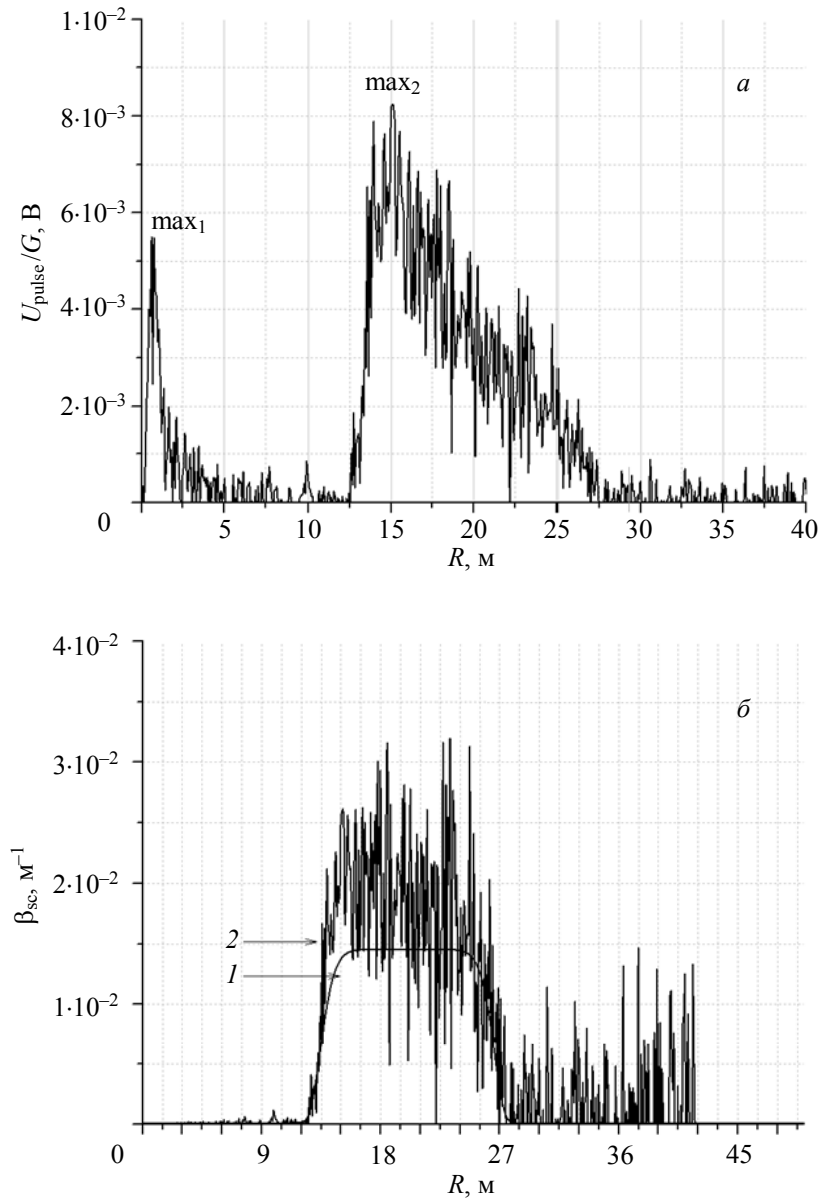


Рис. 6. Эхо-импульс лидара ближнего радиуса действия, скорректированный на геометрический фактор (а), и заданный (кр. 1) и восстановленный (кр. 2) из эхо-импульса лидара профиль показателя ослабления (б). Цель на расстоянии $R_{ob} = 40 \text{ м}$, атмосфера задана дымкой с $S_m = 20 \text{ км}$ и слоем тумана с $S_m = 300 \text{ м}$ протяженностью 20 м , на расстоянии 10 м при $E_{pulse} = 200 \text{ нДж}$, $\tau_0 = 4 \text{ нс}$, $\rho_{ob} = 0.2$, $k_{opt} = 0.8$, $\varphi_s = 1 \text{ мрад}$, $\varphi_{res} = 14 \text{ мрад}$, $\Delta\lambda = 10 \text{ нм}$, $B_{bg} = 1 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М. Дистанционное зондирование атмосферы. – Новосибирск: Наука, 1978. – 256 с.
2. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. – М.: Сов. радио, 1970. – 496 с.
3. Molebny V., McManamon P., Steinvall O., et al. // Opt. Eng. – 2016. – V. 56. – No. 3. – Art. 031220.
4. Williams G.M., Jr. // Opt. Eng. – 2017. – V. 56. – No. 3. – Art. 031224.
5. Fersch T., Weigel R., Koelpin A. // Proc. SPIE. – 2017. – V. 10219. – P. 102190T.
6. Oguchi T. // Proc. IEEE. – 1983. – V. 71. – No. 9. – P. 1029–1078.
7. Rasshofer R.H. et al. // Adv. Radio Sci. – 2011. – V. 9. – P. 49–60.
8. Hess M., Koepke P., Schult I. // Bull. Am. Met. Soc. – 1998. – V. 79. – P. 831–844.
9. Бартенева О.Д., Довгялло Е.Н., Полякова Е.А. // Труды ГГО. – 1967. – Вып. 220. – С. 5–19.
10. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Дальность действия, всесуточность и всепогодность телевизионных приборов наблюдения. – М.: Машиностроение, 2011. – 218 с.
11. Deirmenjian D. Electromagnetic Scattering of Spherical Polydispersions. – Amsterdam; New York: Elsevier, 1969. – 314 p.
12. Al Naboulsi M. // Opt. Eng. – 2004. – V. 43. – No. 2. – P. 319.

Поступила в редакцию 18.09.2022,
принята в печать 18.11.2022.

Лисенко Андрей Александрович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, e-mail: lisenko@iao.ru;

Шаманаев Виталий Сергеевич, к.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр. ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, e-mail: shvs@iao.ru;

Шестериков Евгений Викторович, к.т.н., зав. лабораторией радиофотоники ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, e-mail: evsh@iao.ru;

Креков Михаил Георгиевич, аспирант ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, e-mail: mikhailkrekov@gmail.com;

Емельянов Олег Юрьевич, магистрант НИ ТГУ, e-mail: olegik99@gmail.com.