

И.А. Потапова

**ОЦЕНКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
АТМОСФЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

I.A. Potapova

**ESTIMATING OF INSTRUMENTAL ERRORS
OF ATMOSPHERE CHARACTERISTICS
LIDAR MEASUREMENTS**

В работе найдено новое решение лидарного уравнения для симметричных (два равных шага) и несимметричных (два разных шага) схем обработки данных зондирования. Это решение не использует приближений численного дифференцирования. Оно было применено для оценки погрешности коэффициента ослабления атмосферы с учетом данных эксперимента. Показано, что небольшие систематические погрешности эхо-сигнала существенно влияют на результаты решения обратной задачи.

Ключевые слова: лидарное зондирование, коэффициент ослабления, решение лидарного уравнения.

It was found a new solution of lidar equation for symmetric (two equal steps) and non-symmetric (two different steps) probing data interpretational schemes. This solution was found without using the numerical differentiation approximation. New solution was used for extinction coefficient error estimating. It was shown small systematic errors in experimentally measured echo signals can essentially affect the results of inverse problems solutions.

Key words: lidar sounding, attenuation coefficient, lidar equation solution.

В работе [Егоров, 2007] для анализа данных дистанционных лазерных измерений предложены алгоритмы, базирующиеся на новом строгом решении лидарного уравнения, включающего мощность фоновой засветки. Отмечено, что найденное решение является дифференциальным. С использованием данных эксперимента выполнен анализ погрешностей определения искомым характеристик. Результаты анализа показали, что на основе нового решения лидарного уравнения найдены эффективные алгоритмы обработки сигналов малой мощности. Получены и другие результаты решения проблемы. Вместе с тем, остается проблема разработки лидарных методов, учитывающих геометрические особенности приемопередающих схем устройств, специфику системы регистрации излучения, сдвиг нуля эхо-сигнала. Дальнейшие усилия в области разработки методов интерпретации данных, направленные на повышение точности результатов, требуются в части замены дифференциального решения решением, более приемлемым для обработки сигналов реальных натуральных измерений.

Решение лидарного уравнения для симметричной и несимметричной схем обработки данных зондирования

Интерпретация данных лидарного зондирования атмосферного аэрозоля основывается в настоящей работе на обращении лидарного уравнения, записанного для коротких зондирующих импульсов и в приближении однократного рассеяния. Это уравнение связывает сигнал эластичного обратного рассеяния с оптическими характеристиками атмосферного аэрозоля и записано в общем случае неоднородной атмосферы в работе [Егоров, 2007]. В работе [Егоров, 2005] найдено дифференциальное решение этого уравнения.

В случае однородной атмосферы, когда роль инструментальных погрешностей наиболее значительна, уравнение можно записать в виде:

$$P_i = P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i), \tag{1}$$

где P_i – мощность сигнала обратного рассеяния; P_* – мощность солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара, зависящая от положения точки посылки импульсов и связанного с ним направления на исследуемый объем; R_i – расстояние от лидара до i -го зондируемого рассеивающего элемента; $B = A\beta$, A – постоянная лидара, β – коэффициент обратного рассеяния; σ – коэффициент ослабления.

Для повышения точности результатов разработано новое решение задачи.

Уравнение (1), записанное для двух дополнительных зондируемых элементов (j -го, k -го), дает возможность сформулировать два дополнительных равенства:

$$P_j = P_* + \frac{B}{R_j^2} \exp(-2\sigma R_j), \tag{2}$$

$$P_k = P_* + \frac{B}{R_k^2} \exp(-2\sigma R_k). \tag{3}$$

В результате получается система из трех уравнений относительно неизвестных величин P_* , B , σ .

Исключение неизвестных P_* , B из системы (1)–(3) приводит к уравнению

$$\frac{P_i - P_j}{P_i - P_k} = \frac{1 - \frac{R_i^2}{R_j^2} \exp[-2\sigma(R_j - R_i)]}{1 - \frac{R_i^2}{R_k^2} \exp[-2\sigma(R_k - R_j)]} \tag{4}$$

для величины σ в общем случае несимметричной схемы обработки данных зондирования.

Особенно простым оказывается его решение для симметричной схемы обработки данных, когда

$$j = i + m, \quad k = i + 2m. \quad (5)$$

В таком случае уравнение (4) можно записать в виде:

$$\frac{P_i - P_{i+1}}{R_{i+2m}^2} X_m^2 - \frac{P_i - P_{i+2m}}{R_{i+m}^2} X_m + \frac{P_{i+m} - P_{i+2m}}{R_i^2} = 0, \quad (6)$$

где
$$X_m = \exp(-2\sigma m \Delta), \quad R_k - R_i = 2m \Delta, \quad (7)$$

Δ – шаг зондирования.

Решением уравнения (6) является выражение:

$$X_m = \frac{b_{im} \pm \sqrt{b_{im}^2 - 4a_{im}c_{im}}}{2a_{im}}, \quad (8)$$

где
$$a_{im} = \frac{P_i - P_{i+m}}{R_{i+2m}^2}, \quad b_{im} = \frac{P_i - P_{i+2m}}{R_{i+m}^2}, \quad c_{im} = \frac{P_{i+m} - P_{i+2m}}{R_i^2}. \quad (9)$$

С учетом введенных обозначений для коэффициента ослабления получается формула:

$$\sigma = -\frac{1}{2m\Delta} \ln X_m. \quad (10)$$

Аналогичное решение получается для величины P_* .

Для определения знака в формуле (8) решается прямая и обратная задача, т.е. задаются константы P_* , B , σ , с их использованием рассчитывается мощность эхо-сигнала, по нему, на основании выражения (10), определяется величина σ . Знак выбирается из условия совпадения заданной и рассчитанной величины коэффициента ослабления.

Если перед решением обратной задачи в сигнал ввести возмущение, то рассчитанная величина коэффициента ослабления будет отличаться от заданной величины. Различие этих величин характеризует чувствительность результата расчета к величине возмущения. Таким образом, можно оценивать погрешности σ , связанные с погрешностями эхо-сигналов различных типов (случайными, систематическими). В работе [Егоров, 2007] основное внимание уделялось случайным погрешностям для лидара на основе ЛИВО [Июффе, 1977]. Рассматривались особенности как симметричных, так и несимметричных схем обработки данных. Для несимметричных схем погрешности оценивались в линейном при-

ближении [Худсон, 1970]. Наличие систематических погрешностей может существенно исказить результаты интерпретации экспериментальных данных.

Результаты оценки систематической погрешности коэффициента ослабления

В качестве примера на рис. 1 приведена погрешность измерения эхо-сигнала, связанная с потерей чувствительности приемника при освещении его излучением, рассеянным в процессе прохождения через атмосферу лазерного импульса. Погрешность ΔP отнесена к величине фоновой засветки. Ее оценка выполнена для параметров аппаратуры работ [Егоров, 2005, 2007; Иоффе, 1977].

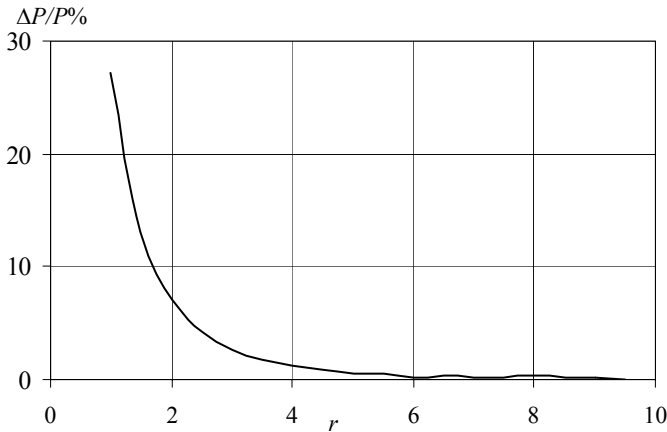


Рис. 1. Зависимость величины инструментальной погрешности $\Delta P/P$ от расстояния зондирования r

На рис. 2 представлена погрешность коэффициента ослабления, соответствующая инструментальной погрешности рис. 1. Вычисления проводились для заданных параметров P_* , B . Видно, что погрешность может превысить 100 %.

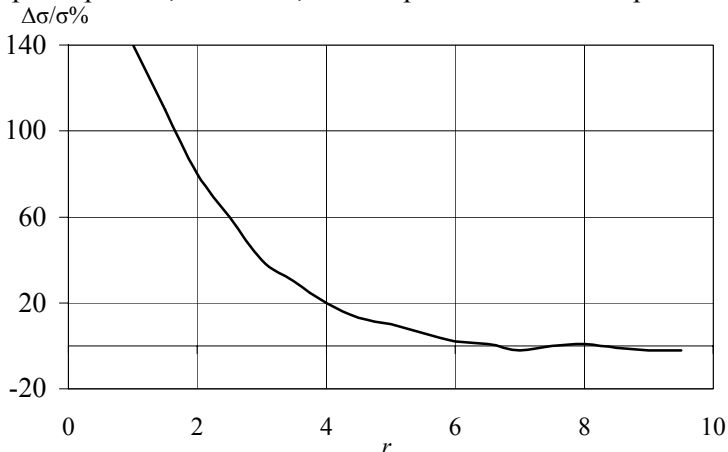


Рис. 2. Зависимость погрешности коэффициента ослабления от расстояния зондирования r

На рис. 3 представлена погрешность коэффициента ослабления, вычисленная для неизвестных параметров P_* , B . Она существенно превышает погрешность, приведенную на рис. 2.

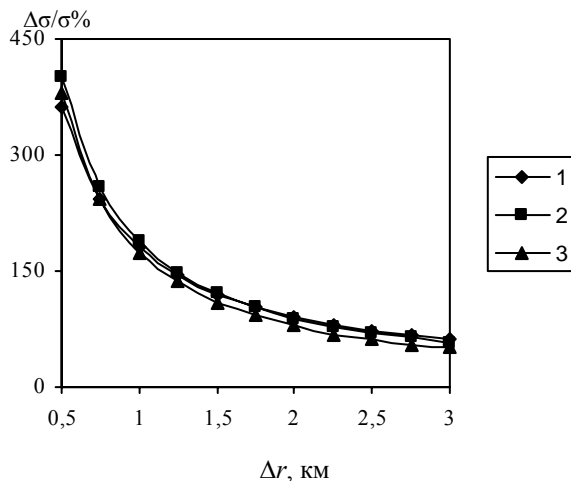


Рис. 3. Зависимость погрешности коэффициента ослабления от шага зондирования Δr для различных расстояний зондирования r . 1 – $r = 0,5$ км, 2 – $r = 1,0$ км; 3 – $r = 1,5$ км

Заклучение

В работе найдено новое решение лидарного уравнения для разных схем обработки данных зондирования. Рассмотрены симметричные (два равных шага обработки данных) и несимметричные схемы (два разных шага обработки данных). Это решение не использует приближений численного дифференцирования. Оно было применено для оценки погрешности коэффициента ослабления атмосферы. При этом было выполнено обращение эхо-сигналов, принятых в процессе зондирования однородной атмосферы из одной точки пространства. Анализ погрешностей определения искомых характеристик был выполнен с использованием данных эксперимента. Показано, что погрешность определения коэффициента ослабления многократно превышает погрешность эхо-сигнала, т.е. небольшие систематические погрешности существенно влияют на результаты решения обратной задачи. Погрешность коэффициента ослабления, найденного по схеме с известной фоновой засветкой, существенно меньше погрешности определения искомой величины, найденной по схеме с неизвестной фоновой засветкой.

Литература

1. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Обращение лидарных сигналов малой мощности // Оптический журнал, 2007, т. 74, № 10, с. 25–28.
2. Егоров А.Д., Потапова И.А. Анализ погрешностей обращения лидарных сигналов малой мощности // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2005, вып.6(554), с. 62–66.
3. Иоффе М.М., Приходько М.Г. Справочник авиационного метеоролога. – М.: Воениздат, 1977. – 304 с.
4. Худсон Д. Статистика для физиков. – М.: Мир, 1970. – 276 с.