

УДК 551.501
EDN: YUCXPO

PACS: 42.68.Bz, 42.68.Ge, 42.68.Jg

Автокоррекция амплитудных профилей обратного рассеяния зондирующего излучения в ближней зоне атмосферной трассы

П. Н. Назаренко

Описан метод коррекции атмосферных профилей, регистрируемых биаксиальными метеолидарами. Применение описанного метода позволяет исключить влияние на регистрируемые атмосферные профили таких факторов как квадрат расстояния, зона неполного перекрытия лазерного пучка и поля зрения приемного канала лидара, неопределенность начала отсчета высоты трассы, другие аппаратные амплитудные и временные параметры прибора. Проводится обсуждение полученных результатов.

Ключевые слова: лидарное уравнение, профиль коэффициента обратного рассеяния, опорный амплитудный профиль.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-4-371-378

Введение

Одноволновые аэрозольные лидары (облакомеры) являются одними из наиболее простых универсальных и информативных устройств для изучения и контроля параметров атмосферы. Точность аэрозольных лидарных измерений зависит как от аппаратных характеристик лидаров, так и от применяемых лидарных методов измерений. Существующие методы основаны на преобразовании регистрируемых амплитудных профилей эхосигнала в профили коэффициента обратного рассеяния по методу обращения лидарного уравнения [1] с предварительной обработкой полученного массива данных: вычитания фона, нормировки на квадрат расстояния, нормировании на геометрический фактор [2–4].

Неопределенность начала отсчета высоты трассы, связанная с длительностью опти-

ческого импульса (порядка 100 нс), зависимость от высоты пространственного распределения сечения лазерного пучка, формы излучения в сечении пучка, неопределенность геометрического фактора (отношения функции перекрытия приемного и передающего каналов лидара к квадрату расстояния) могут приводить к достаточно большим систематическим ошибкам в измерении профилей обратного рассеяния аэрозолей в ближней зоне зондируемой трассы.

Для определения зависимости геометрического фактора от расстояния используются аналитические, трассировочные и экспериментальные методы [5–9]. Во всех перечисленных методах в предложенных математических моделях присутствует расстояние, что вследствие неопределенности начала отсчета высоты и несоосности приемного и передающего каналов приводит к систематическим погрешностям измерения атмосферных профилей.

С целью устранения указанных выше факторов, влияющих на точность измерений, разработан метод калибровки биаксиальных лидаров и выполнены сравнительные исследования по применению данного метода для измерения атмосферных профилей.

Назаренко Павел Николаевич, в.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: npn05@mail.ru

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Беларусь, 220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-1.

Статья поступила в редакцию 1.08.2024

После доработки 22.08.2024

Принята к публикации 26.08.2024

Шифр научной специальности: 1.3.19

© Назаренко П. Н., 2024

Анализ геометрической схемы лидарного зондирования

В рамках модели однократного упругого рассеяния мощность оптического эхосигнала, приходящего с расстояния z на приемник лидара, описывается основным лидарным уравнением, имеющим вид [1, 2]:

$$P(z) = \frac{A(z)\beta(z)Q(z)\exp\left[-2\int_0^z \alpha(z) dz\right]}{z^2} + P_\phi, \quad (1)$$

где $P(z)$, P_ϕ – мощность оптического эхосигнала, приходящего с расстояния z на приемник лидара, и мощность фоновой засветки, соответственно; $A(z)$ – аппаратная функция лидара, не зависящая от параметров атмосферы; $Q(z)$ – функция перекрытия приемного и передающих каналов лидара (зависит от геометрии оптической системы лидара, максимальное значение равно 1); $\beta(z)$ – коэффициент обратного рассеяния на высоте z ; z – высота с которой принимается сигнал; $\alpha(z)$ – коэффициент экстинкции атмосферы на высоте z .

Аппаратная функция лидара описывается выражением:

$$A(z) = P_0 \frac{c\tau}{2} T_\lambda A_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где P_0 – пиковая мощность импульса лазера; c – скорость света; τ – длительность лазерного импульса; T_λ – пропускание приемного и передающего каналов лидара; $A_{\text{пр}}$ – площадь приемного телескопического канала.

Геометрический фактор $G(z) = Q(z)/z^2$ в случае биаксиальных лидаров зависит от высоты определяется дистанцией зондирования вертикальной атмосферной трассы и имеет разную зависимость от высоты z . В ближней зоне зондирования можно выделить «мертвую» зону и зону частичного перекрытия лазерного излучения поля зрения приемного канала.

На рисунке 1 представлена геометрическая схема зондирования атмосферы для биаксиального лидара [3, 4]. Рассеивающая среда занимает область $z > 0$, источник и приемник оптического излучения расположены в плоскости $z = 0$, а их оси ориентированы параллельно оси Oz и разнесены на расстояние d_0 .

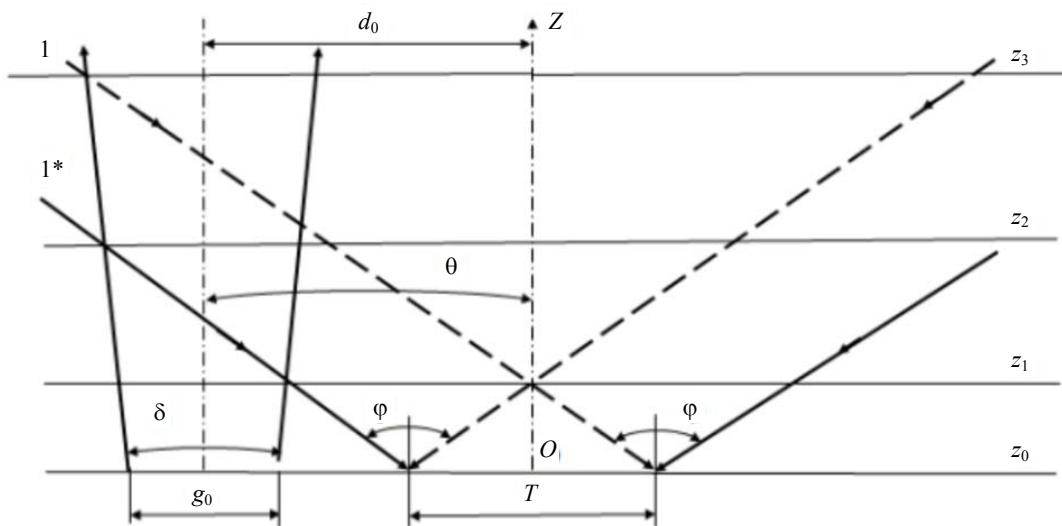


Рис. 1. Геометрическая схема зондирования атмосферы для биаксиального лидара

В данной схеме используются следующие обозначения:

Z_3 – дистанция до границы полного перекрытия приемного и передающего каналов лидара при эффективной апертуре приемного канала, равной T ;

Z_2 – дистанция до границы полного перекрытия приемного и передающего каналов

лидара при эффективной апертуре приемного канала, меньшей T ;

Z_1 – дистанция до границы между «мертвой» зоной и зоной частичного перекрытия приемного и передающего каналов;

$Z_0 = 0$ – плоскость размещения объективов приемного и передающего каналов;

d_0 – межосевое расстояние;

T – диаметр объектива приемного канала;
 θ – угол между осями поля зрения приемного канала и лазерного излучателя;
 g_0 – диаметр объектива лазерного излучателя;
 δ – расходимость лазерного излучения;
 φ – поле зрения приемного канала.

В области поля зрения приемного канала лидара, ограниченной лучами 1 и 1*, эффективная апертура приемного объектива T_{eff} меньше его полной апертуры T . В «мертвой зоне» от $Z_0 = 0$ до Z_1 конус лазерного излучения и поле зрения приемного канала лидара не перекрываются, $Q(z) = 0$, $P(z) = 0$. В области высот от Z_1 до Z_2 происходит частичное перекрытие поля зрения приемного канала и конуса лазерного излучения, $0 < Q(z) < 1$, $T_{eff} < T$. В области высот от Z_2 до Z_3 $Q(z) = 1$, но $T_{eff} < T$. При высотах $z > Z_3$ эффективная апертура $T_{eff} = T$.

В малоугловом приближении высота границы полного перекрытия приемного и передающего каналов R_{min} может быть определена по формуле [4]:

$$R_{min} = Z_3 - Z_0 = \frac{2d_0 + g_0 + T}{2\theta + \varphi - \delta}. \quad (3)$$

Дистанция до границы между «мертвой» зоной и зоной частичного перекрытия приемного и передающего каналов r_{min} может быть определена как:

$$r_{min} = Z_1 - Z_0 = \frac{2d_0 - g_0 - T}{2\theta + \varphi + \delta}. \quad (4)$$

Таким образом, точная коррекция искажений профилей обратного рассеяния зондирующего излучения в ближней зоне в рамках математической модели, описываемой уравнением (1), практически трудновыполнима, так как требует учета большого количества переменных.

Кроме того, при использовании в качестве источников зондирующего излучения лазерных диодов расходимость лазерного пучка и распределение интенсивности в его сечении различны в двух перпендикулярных направлениях. На рисунке 2 в качестве примера представлены профили распределения интенсивности излучения по сечению лазерного пучка в дальней зоне перпендикулярно (а) и параллельно (б) относительно p - n -перехода лазерного диода SPL PL90-3 производства компании OSRAM GmbH (Германия).

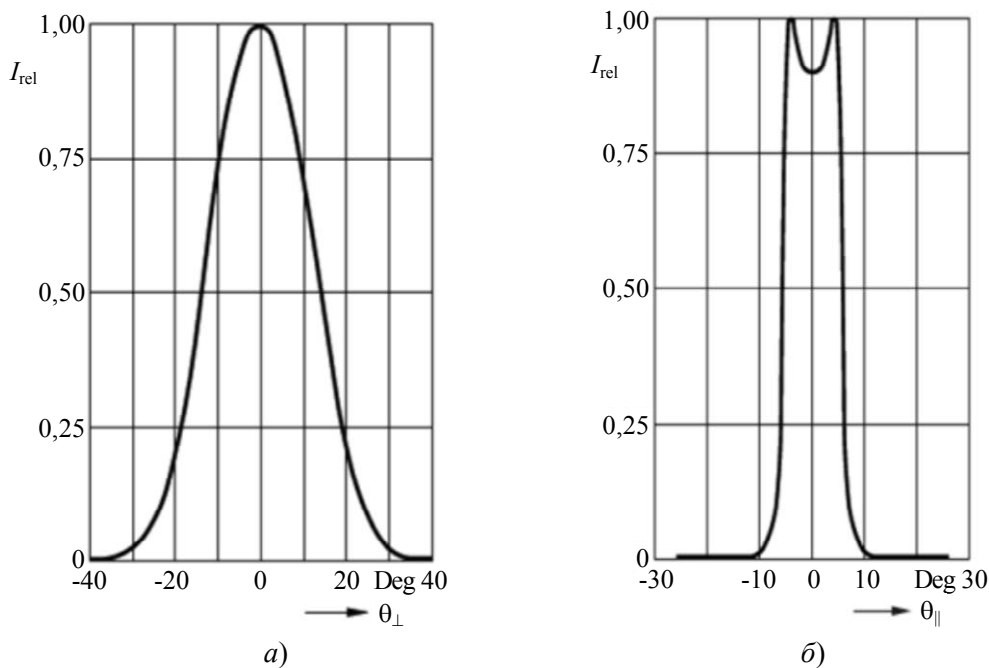


Рис. 2. Профили распределения интенсивности излучения по сечению лазерного пучка в дальней зоне перпендикулярно (а) и параллельно (б) относительно границы p - n -перехода лазерного диода SPL PL90-3

В данном случае лазерный пучок имеет две взаимно перпендикулярных плоскости симметрии. Следовательно, при определении высот R_{\min} и r_{\min} следует также учитывать ориентацию p - n -перехода лазерного диода в плоскости Z_0 относительно оси передающего канала. В зависимости от ориентации p - n -перехода изменяются границы ближней зоны, что в свою очередь приводит к дополнительным погрешностям в их определении.

Относительный метод коррекции профилей обратного рассеяния зондирующего излучения

Предлагаемый относительный метод коррекции профилей обратного рассеяния зондирующего излучения основан на определении нормируемого профиля атмосферного обратного рассеяния как отношения амплитуд измеряемого и опорного профилей регистрируемых на одинаковых высотах эхосигналов с учетом ослабления атмосферой зондирующего излучения лидара для измеряемого и опорного сигналов. В качестве опорного профиля используется профиль эхосигнала, полученный в условиях ясной атмосферы при отсутствии облачности и других атмосферных образований и вертикальной видимости, превышающей 10 км.

Для решения задачи измерения профиля обратного объемного рассеяния $\beta(z)$ в рамках предлагаемого метода вводится понятие относительной функции профиля мощности обратно рассеянного излучения $F(z)$:

$$F(z) = \frac{P(z) - P_{\text{физ}}}{P_o(z) - P_{\text{фо}}}, \quad (5)$$

где $P(z)$ и $P_o(z)$ – мощности обратно рассеянного измеряемого и опорного излучения на высоте z , соответственно; $P_{\text{физ}}$ и $P_{\text{фо}}$ – мощности фоновой засветки на измеряемой и опорной трассах, соответственно;

Лидарное уравнение (1) приобретает вид:

$$F(z) = \frac{\beta_{\text{из}}(z)}{\beta_o(z)} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha_o \left(\frac{\alpha_{\text{из}}(z)}{\alpha_o} 1 \right) dz \right], \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{из}}(z)$ и α_o – коэффициенты экстинкции на высоте z измеряемой и опорной трассы; $\beta_{\text{из}}(z)$,

$\beta_o(z)$ – коэффициенты обратного рассеяния на высоте z измеряемой и опорной трассы.

Соответственно, $F(z)$ представляет собой также функцию профиля «ослабленного» коэффициента обратного рассеяния, нормированного на профиль коэффициента обратного рассеяния опорного сигнала (относительный профиль) и умноженного на коэффициент пропускания атмосферы (правый сомножитель). Приравнявая правые части уравнений (5) и (6), получаем уравнение связи относительного профиля коэффициента обратного рассеяния с мощностями обратно рассеянных измеряемого и опорного излучения:

$$\beta^*(z) = \frac{\beta_{\text{из}}(z)}{\beta_o(z)} = \frac{P(z) - P_{\text{физ}}}{P_o(z) - P_{\text{фо}}} \times \exp \left[2 \int_0^z \alpha_o \left(\frac{\alpha_{\text{из}}(z)}{\alpha_o} 1 \right) dz \right]. \quad (7)$$

Коэффициенты экстинкции на измеряемой и опорных трассах $\alpha_{\text{из}}(z)$ и α_o при вертикальной видимости, превышающей максимальную рабочую высоту, определяются из величин метеорологической оптической дальности (МОД) [10], фиксируемых метеорологическими станциями:

$$\alpha = \left(\frac{3}{\text{МОД}} \right) \left(\frac{550}{\lambda} \right)^q, \quad (8)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения в нм; q – параметр распределения аэрозольных частиц по размерам, связанный с МОД [10, 11].

В аналитическом уравнении (7), полученном из лидарного уравнения (1), отсутствуют такие факторы как квадрат расстояния, геометрический фактор, другие аппаратные амплитудные и временные параметры прибора. Для преобразования измеренного массива амплитудных данных в профили коэффициента обратного рассеяния требуются только предварительное измерение амплитудного опорного профиля и данные измерения метеорологической оптической дальности на момент измерения опорного и регистрируемых профилей.

Таким образом, предлагаемый относительный метод измерения атмосферного профиля коэффициента обратного рассеяния

существенно снижает систематические погрешности измерений атмосферных профилей обратного рассеяния за счет исключения факторов, дающих основной вклад в данные погрешности и перечисленных во введении. В данном методе измерения в отличие от прямых методов требуется измерение только относительного амплитудного профиля зондирующего излучения и данные измерения МОД на опорной и измеряемой атмосферной трассах.

Уменьшение переменных в уравнении профиля коэффициента обратного рассеяния (6) по сравнению с основным лидарным уравнением (1) позволяет упростить алгоритмическое обеспечение измерительных систем за счет исключения корреляционной обработки сигналов, требующей больших вычислительных ресурсов.

Профили, измеренные по описанному методу, позволяют достаточно просто идентифицировать атмосферные образования (осадки, туман, облачные образования), а также определить нижнюю границу облачности, вертикальную видимость, плотность и количество облачных слоев.

Апробация разработанного метода

Исследования проводились на метеоплощадке ОАО «Пеленг» (Минск, Беларусь). Регистрация профилей оптических эхосигналов осуществлялась одновременно несколькими биаксиальными облакомерами СД-02-2006 (длина волны 905 нм, длительность импульсов 120 нс, рабочая дистанция до 8 км), расположенными на расстоянии не более 1 м друг от друга. Одновременно с регистрацией атмосферных профилей проводилась регистрация МОД по данным измерений нефелометра СЛ-03.

Полученные массивы данных для каждого облакомера обрабатывались при использовании алгоритмов обработки данных на основе как прямого штатного метода облакомеров, так и описанного выше метода. Показания облакомеров сравнивались с показаниями коаксиального облакомера CL-31 производства Vaisala.

В качестве примера на рисунке 3 представлены измеренные амплитудные профили $P(z)$ (выделены сиреневым и красным цветом) и скорректированные по прямому методу профили $P^*(z)$ (выделены синим и зеленым цветом), полученные 28.12.2021 года в 11:40:28 в условиях слабого снега при использовании двух облакомеров СД-02(1) (выделены синим и красным цветом) и СД-02(2) (выделены зеленым и сиреневым цветом). Наиболее сильно измеренные и скорректированные профили как по форме, так и по амплитуде отличаются в ближней зоне, соответствующей области неполного перекрытия полей зрения приемных каналов облакомеров СД-02(1) и СД-02(2) с пучками зондирующего излучения (рис. 3б). Данные отличия связаны с разной протяженностью зон частичного перекрытия лазерного пучка и поля зрения приемного канала облакомеров.

В дальней зоне на дистанциях более 100 м полученные профили хотя и имеют пики на высоте 180 м, но не совпадают по амплитуде (рис. 3а). Данные несовпадения профилей характерны и для других облакомеров, одновременно работавших с СД-02(1) и СД-02(2).

На рисунке 4 приведены те же измеренные амплитудные профили $P(z)$ (выделены красным цветом), опорные амплитудные профили $P_0(z)$ (выделены сиреневым цветом) и соответствующие им профили относительного коэффициента обратного рассеяния $\beta^*(z)$ (выделены синим и зеленым цветом).

Профили $\beta^*(z)$ на рисунках 4 построены на тех же массивах данных, что и профили на рисунке 3, но на основе описанного в предыдущем разделе метода. Из сравнения профилей $\beta^*(z)$ видно, что они практически совпадают друг с другом. Данное совпадение профилей характерно и для других облакомеров, одновременно работавших с СД-02(1) и СД-02(2), что свидетельствует об отсутствии аппаратных искажений. В ближней зоне на дистанциях до 45 м расчетные профили $\beta^*(z)$ практически не зависят от высоты, что связано с наличием однородных осадков (слабого снега).

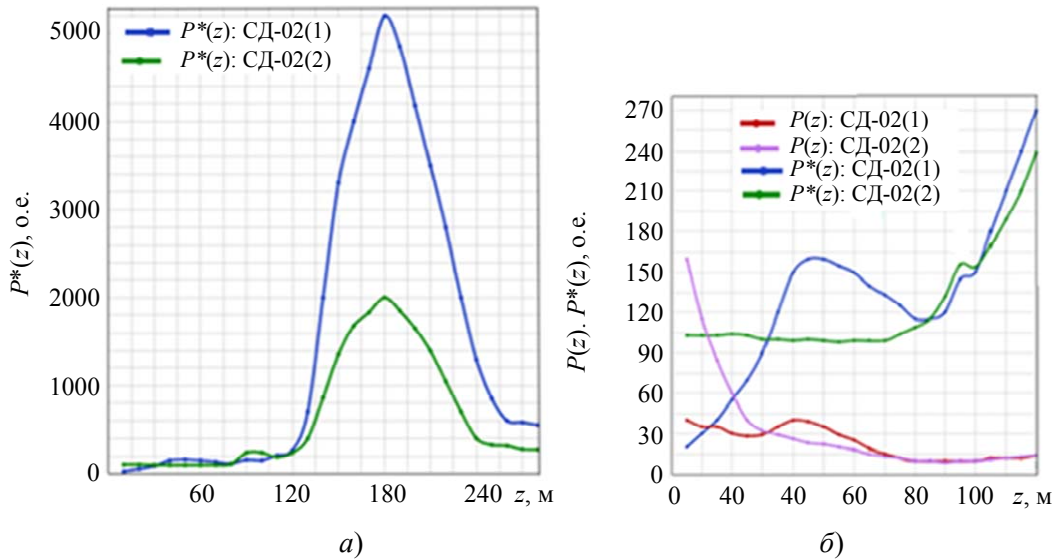


Рис. 3. Скорректированные $P^*(z)$ (синий и зеленый цвет) и измеренные $P(z)$ (красный и сиреневый цвет) профили эхосигнала двух лидаров СД-02(1) (синий и красный цвет) и СД-02(2) (зеленый и сиреневый цвет) на дистанциях: а) – 285 м и б) – 120 м

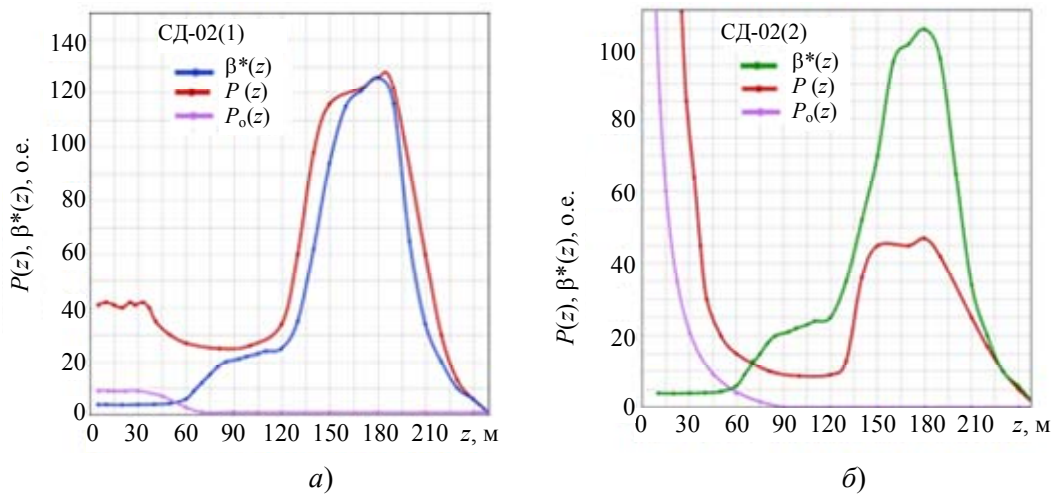


Рис. 4. Измеренные амплитудные профили эхосигнала $P(z)$ (красный цвет), опорные амплитудные профили $P_0(z)$ (сиреневый цвет) и соответствующие им профили относительного коэффициента обратного рассеяния $\beta^*(z)$ двух лидаров: а) – СД-02(1) (синий цвет) и б) – СД-02(2) (зеленый цвет)

На рисунке 5 представлены опорные $P_0(z)$ (выделены синим цветом), измеренные $P(z)$ (выделены красным цветом) амплитудные профили эхосигнала и соответствующие им профили относительного коэффициента обратного рассеяния $\beta^*(z)$ (выделены зеленым цветом), полученные в условиях сильного снега (рис. 5а), слабой дымки (рис. 5б).

Из сравнения данных рисунков видно, что в условиях однородной атмосферы профили $\beta^*(z)$ при МОД более 1 км практически не зависят от высоты зондирования атмосферы. Резкий спад профиля $\beta^*(z)$ (высота 260 м) на рисунке 5а связан с полным ослаблением зондирующего излучения в условиях сильного снега.

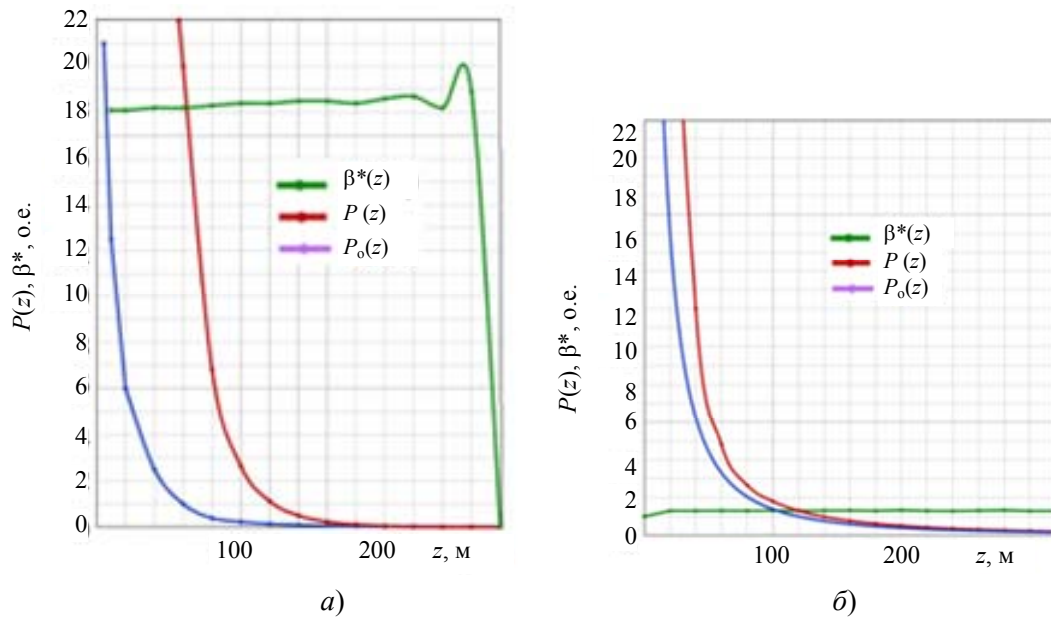


Рис. 5. Опорные $P_0(z)$ (синий цвет), измеренные $P(z)$ (красный цвет) амплитудные профили эхосигнала и соответствующие им профили относительного коэффициента обратного рассеяния $\beta^*(z)$ (зеленый цвет)

Заключение

Описанный выше метод расчета атмосферных профилей обратного рассеяния значительно проще существующих алгоритмов на основе прямых методов расчета, так как в данном методе отсутствует необходимость коррекции аппаратных искажений, вызванных неопределенностью начала отсчета высоты трассы при длительности зондирующих импульсов порядка 100 нс, зависимостью от высоты неоднородности интенсивности и формы излучения в сечении зондирующего пучка, а также зависимостью от высоты степени перекрытия лазерного пучка и поля зрения приемного канала.

На основании проведенных исследований установлено, что профили, полученные в результате обработки массивов данных на основе разработанного алгоритма для различных биаксиальных лидаров, практически идентичны между собой в отличие от соответствующих профилей, полученных прямым методом, и хорошо согласуются с данными коаксиального облакомера. Кроме того, полученные профили позволяют достаточно просто идентифицировать атмосферные образования (осадки, туман, облачные образования).

Апробация разработанного алгоритма обработки массивов данных, полученных на не-

скольких одновременно работавших однотипных биаксиальных лидарах, указывает на возможность наиболее эффективного применения данного метода в ближней зоне на дистанциях до 500–600 м, в которой прямые методы обработки характеризуются большими систематическими погрешностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klett J. D. / Applied Optics. 1981. Vol. 20. № 2. P. 211.
2. Vande Hey J. / Applied Optics. 2011. Vol. 50. № 7. P. 5791.
3. Веретенников В. В. / Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 9. С. 1002.
4. Harms J. / Applied Optics. 1979. Vol. 18. № 10. P. 1559.
5. Stelmaszczyk K. / Applied Optics. 2005. Vol. 44. № 7. P. 1323.
6. Бобровников С. М. / Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 07. С. 551.
7. Dho S. W. / Applied Optics. 1997. Vol. 36. № 24. P. 6009.
8. Velotta R. / Applied Optics. 1998. Vol. 37. № 30. P. 6999.
9. Takeuchi N. / Rev. Laser Eng. 1987. Vol. 15. P. 269.
10. Ачишев П. П. / Проблемы энергетики. 2016. № 3–4. С. 95.
11. <https://www.ece.mcmaster.ca/~hranilovic/woc/resources/local/spie2000b.pdf>.

Auto correction of amplitude profiles of backscattering of probing radiation in the near zone of the atmospheric route track

P. N. Nazarenko

SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”
68-1 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220072, Belarus
E-mail: npn05@mail.ru

Received 1.08.2024; revised 22.08.2024; accepted 26.08.2024

The paper describes a method for correcting atmospheric profiles recorded by biaxial meteorological lidars. The use of the described method makes it possible to eliminate the influence on the recorded atmospheric profiles of such factors as the square of the distance, the zone of incomplete overlap of the laser beam and the field of view of the lidar receiving channel, the uncertainty of the reference height of the path, and other hardware amplitude and time parameters of the device. The results obtained are discussed.

Keywords: lidar equation, backscatter coefficient profile, reference amplitude profile.

REFERENCES

1. Klett J. D., Applied Optics **20** (2), 211 (1981).
2. Vande Hey J., Applied Optics **50** (7), 5791 (2011).
3. Veretennikov V. V., Optics of the atmosphere and ocean. **11** (9), 1002 (1998) [in Russian].
4. Harms J., Applied Optics **18** (10), 1559 (1979).
5. Stelmaszczyk K., Applied Optics **44** (7), 1323 (2005).
6. Bobrovnikov S. M., Optics of the atmosphere and ocean **31** (7), 551 (2018) [in Russian].
7. Dho S. W., Applied Optics **36** (24), 6009 (1997).
8. Velotta R., Applied Optics **37** (30), 6999 (1998).
9. Takeuchi N., Rev. Laser Eng. **15**, 269 (1987).
10. Agishev R. R., Problems of energy. 3–4, 95 (2016) [in Russian].
11. <https://www.ece.mcmaster.ca/~hranilovic/woc/resources/local/spie2000b.pdf>.