

Г.Н. Балденков, В.И. Козинцев, Е.Э. Можаров

О ПОГРЕШНОСТЯХ ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ

Статья посвящена анализу результатов модельных расчетов погрешностей измерения среднего показателя ослабления атмосферы из-за непостоянства параметра индикатрисы g_π в случае наличия облака на трассе зондирования. Рассмотрены три способа фиксации трассы, на которой измеряется средний показатель ослабления. Показано, что с точки зрения минимизации указанных погрешностей наиболее предпочтительным является способ фиксации длины трассы по спаду сигнала обратного рассеяния в заданное число раз.

Решение уравнения лазерного зондирования для неоднородной атмосферы относительно показателя ослабления $\mu(z)$ даже при отсутствии поглощения зондирующего излучения и в приближении однократного рассеяния является некорректной задачей по причине наличия второй неизвестной функции $g_\pi(z)$ — параметра индикатрисы, характеризующего обратное рассеяние. Для извлечения информации о показателе ослабления в различных диапазонах изменения параметров зондируемой атмосферы используются те или иные априорные предположения о характере функции $g_\pi(z)$. Отклонение реальной зависимости $g_\pi(z)$ от этих предположений приводит к появлению соответствующих методических погрешностей. Причем в зависимости от того, случайным или систематическим образом распределено отклонение вдоль трассы зондирования и известно оно заранее или нет, погрешности будут случайными, систематическими или неисключенными систематическими.

С учетом сложности рассмотрения вопроса в общем виде в статье проведен анализ погрешностей измерений для конкретного лидара «Электроника-03», в котором реализована обработка результатов по интегральному методу [1]. Модель неоднородной атмосферы и диапазоны изменения ее параметров выбраны, исходя из применения указанного лидара для метеобеспечения авиации в условиях плотной дымки и тумана при углах зондирования относительно горизонта до 15° [1,2].

Для анализа систематических погрешностей измерений как более существенных, чем случайные, уровень которых можно снизить усреднением, рассмотрим модель стационарной атмосферы. Будем характеризовать модельную атмосферу постоянным показателем ослабления μ_0 в приземном слое до высоты H_n , начиная с которой $\mu(H) = \mu_0 \exp(k'(H - H_n))$, что соответствует увеличению показателя ослабления в подоблачном слое и нижнем крае облака. Подобная ситуация постоянства или увеличения $\mu(H)$ с высотой является наиболее типичной для условий плотной дымки и тумана [3], а экспоненциальный закон удовлетворительно описывает рост показателя ослабления в нижнем крае облака [4].

В соответствии с данными [5, 6] воспользуемся степенной связью

$$g_\pi = k_1 \mu^{k_2 - 1} \quad (1)$$

и для рассматриваемой модели атмосферы запишем выражение для сигнала обратного рассеяния, скорректированного на квадрат расстояния, в виде

$$S(z) = \begin{cases} S_0 k_1 \mu_0^{k_2} e^{-2\mu_0(z-z_0)} & \text{при } z < z_n; \\ S_0 k_1 \mu_0^{k_2} e^{-2\mu_0(z_n-z_0)} e^{k_2 k(z-z_n) - \frac{2\mu_0}{\kappa} (e^{k(z-z_n)} - 1)} & \text{при } z \geq z_n, \end{cases} \quad (2)$$

при $z \geq z_n$, где $S_0 = S(z_0)$; z_0 — расстояние, с которого начинается обработка сигнала; $k = k' \cdot \sin^2 \nu_3$; ν_3 — угол зондирования относительно горизонта; z_n — расстояние по трассе зондирования до высоты H_n .

Соотношение для расчета среднего показателя ослабления между точками z_0 и z_1 на трассе зондирования по интегральному методу имеет вид

$$\bar{\mu}(z_0, z_1) = \frac{1}{2(z_1 - z_0)} \cdot \ln(I_m/I_1), \quad (3)$$

где $I_m = \int_{z_0}^{z_m} S(z) dz$; $I_1 = \int_{z_1}^{z_m} S(z) dz$; z_m — расстояние, на котором сигнал уменьшается до уровня шумов.

Существенным моментом при реализации обработки по формуле (3) является определение расстояния z_1 , на котором заканчивается измерительная база лидара. Проблема автоматического определения системной регистрации лидара расстояния z_1 может быть решена тремя путями:

- 1) путем реализации фиксированного расстояния $z_1 - z_0$;
- 2) путем реализации фиксированного отношения интегралов в (3);
- 3) путем реализации фиксированного отношения амплитуд $S(z_0)/S(z_1) = n = \text{const}$.

У каждого из этих путей имеются свои преимущества и недостатки. Первый из них допускает наиболее простую приборную реализацию, а полученные таким образом значения $\bar{\mu}$ наиболее корректно сопоставляются с данными фотометрических контрольных приборов с базой $z_1 - z_0$. Второй путь позволяет фиксировать зондируемую оптическую толщину $\bar{\mu}(z_0, z_1) \cdot (z_1 - z_0)$. При этом диапазон изменения регистрируемых интегралов является минимальным. Сложность приборной реализации в этом случае при аналоговом интегрировании сигнала, как в [1], связана с необходимостью иметь информацию о величине асимптотического интеграла к моменту фиксации z_1 в реальном масштабе времени. Третий путь определения расстояния z_1 легко реализуется за счет применения компаратора, фиксирующего момент выполнения условия $S(z_0)/S(z_1) = n$, но при этом увеличивается динамический диапазон изменения интегралов в условиях неоднородной атмосферы.

Погрешности измерения среднего показателя ослабления $\bar{\mu}$ на измерительной базе, выбранной одним из перечисленных путей, рассчитывались по формуле

$$\delta \bar{\mu} = \frac{\bar{\mu}_{\text{изм}} - \bar{\mu}_{\text{ист}}}{\bar{\mu}_{\text{ист}}},$$

где $\bar{\mu}_{\text{изм}}$ определялось по соотношению (3) численным интегрированием сигналов из (2), а $\bar{\mu}_{\text{ист}}$ — по модельному профилю $\mu(z)$ в пределах от z_0 до z_1 . При этом за z_m принималось расстояние, на котором сигнал обратного рассеяния спадал в 250 раз по сравнению с $S(z_0)$. Значение z_m определялось из решения трансцендентного уравнения, полученного из (2) в предположении $S(z_m)/S(z_0) = 250$:

$$2\mu_0(z_n - z_0) - k_2 \cdot k \cdot (z_m - z_n) + \frac{2\mu_0}{k} [e^{k(z_m - z_0)} - 1] = \ln 250. \quad (4)$$

Аналогично определялась величина z_1 для случая регистрации по фиксированному отношению амплитуд. При этом в правой части (4) записывалась величина $\ln n$ для ситуаций, когда $z_1 > z_n$ (см. рис. 1) и $z_1 = z_0 + \ln n / 2\mu_0$ в случае $z_1 \leq z_n$.

Для использования в расчетах погрешностей соотношений (2) следует определить величину параметра k_2 и диапазоны изменения параметров трехпараметрической модели атмосферы.

В [5, 6] для условий плотной дымки и тумана приводятся значения k_2 в диапазоне от 1,2 до 1,6. В расчетах использована меньшая из наиболее вероятного, по нашему мнению, диапазона величина $k_2 = 1,3$.

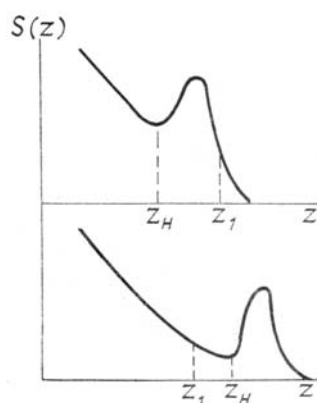


Рис. 1. Зависимость сигнала обратного рассеяния S от расстояния до рассеивающего объема z : а) $z > z_n$, б) $z < z_n$

Диапазоны изменения параметров модели атмосферы были выбраны следующими: $0,5 \text{ км}^{-1} \leq \mu_0 \leq 3 \text{ км}^{-1}$, что соответствует плотной дымке и слабому туману у поверхности земли. Расстояние $z_n \geq 0,1 \text{ км}$, что при углах зондирования для лидара «Электроника-03» от 0 до 15° соответствует диапазону H_n практически от нуля до высот, на которых наличие облака из-за большой оптической плотности приземного слоя не влияет на результат измерений. Для указанных углов зондирования с

учетом данных из [4], по которым k' находится в пределах от 0 до 60 км^{-1} , диапазон k выбран от 0 до 15 км^{-1} . Значения отношений интегралов и сигналов, при которых фиксировалось расстояние z_1 , были выбраны равными 10.

Погрешности измерения показателя ослабления рассчитывались для всей обозначенной трехмерной области параметров модели атмосферы. На рис. 2–4 приведены сечения поверхностей 15%-ной погрешности, которую можно считать максимально допустимой для лидара «Электроника-03» в предположении, что рассматриваемая погрешность является доминирующей (суммарная погрешность измерений этого лидара не должна превышать 25%). За исключением кривой 5 на рис. 2, приведенные кривые соответствуют погрешностям $\delta\bar{\mu} = -15\%$, что обусловлено «завышенным» вкладом в сигнал рассеяния от облака за счет роста $g_\pi(z)$. В результате в выражении (3), полученном в предположении равенства так называемых среднеинтегральных индикатрис на участках вычисления интегралов [7], значение I_1 оказывается завышенным по сравнению с истинной величиной в гораздо большей степени, чем I_m . Это приводит к занижению отношения интегралов и, соответственно, среднего показателя ослабления. Описанный эффект тем больше, чем меньше μ_0 (прозрачнее приземная атмосфера) и чем больше k (выше скорость роста μ по мере вхождения в облако). Следовательно, на рисунках области параметров μ_0 и k ниже и правее кривых соответствуют еще большим погрешностям. В этом случае задача состоит в том, чтобы область с погрешностями выше заданного уровня была минимальной в пространстве вероятных параметров модели атмосферы.

В качестве характеристики степени неоднородности атмосферы в данной модели удобно ввести параметр степени неоднородности $k/2\mu_0$, который задает угловое положение прямых, проходящих через начало координат на рассматриваемых рисунках (штриховые линии). Из рисунков видно, что от значений параметра $k/2\mu_0$ зависят такие характеристики сигнала от облака, как его относительная амплитуда и положение максимума относительно z_H . Для сравнения результатов расчетов можно применить параметр степени неоднородности, полагая, что результат тем лучше, чем более неоднородна атмосфера, в которой погрешности не превышают заданного уровня.

С точки зрения такого критерия результаты, представленные на рис. 2 для отрицательной погрешности, равной -15% , и значений $z_1 = 0,8$ и $1,2$ км, различаются незначительно, ($k/2\mu_0 = 1,45$ и $1,25$ соответственно). Однако для базы $1,2$ км на рисунке в явном виде присутствует недостаток, свойственный фиксированному z_1 , — существенное влияние краевого эффекта с уменьшением $\mu(z)$, когда значение z_m приближается к z_1 и, следовательно, падает точность определения I_1 . Это приводит к завышению $\bar{\mu}_{\text{изм}}$ и к появлению области положительных погрешностей, превышающих 15% , относительно кривой 5. В этом случае абсолютное значение $\delta\bar{\mu}$ может быть выше заданного уровня даже в однородной атмосфере ($k = 0$).

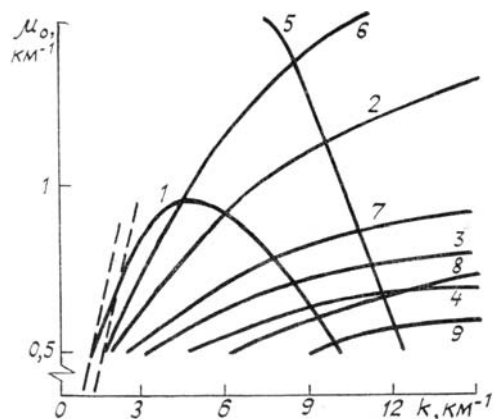


Рис. 2. Сечения поверхностей постоянной погрешности ($\delta\bar{\mu} = \pm 15\%$) плоскостями $z_H = \text{const}$ в координатах k и μ_0 . Фиксированное z_1 : $\delta\bar{\mu} = -15\%$ (1–4, 6–9), $+15\%$ (5); $z_1 = 0,8$ км (1–5), $1,2$ (6–9); $z_H = 0,8$ км (1, 5, 6), $1,2$ (2, 7), $1,6$ (3, 8), 2 (4, 9)

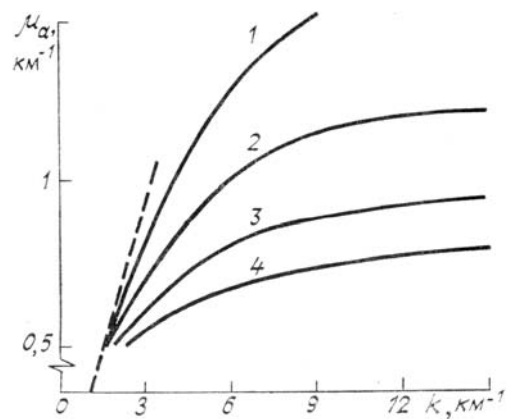


Рис. 3. Сечения поверхности постоянной погрешности ($\delta\bar{\mu} = -15\%$) плоскостями $z_H = \text{const}$ в координатах k и μ_0 . Фиксированное отношение интегралов. $z_H = 0,8$ км (1), $1,2$ (2), $1,6$ (3), 2 (4)

Более предпочтительными выглядят результаты, представленные на рис. 3. Здесь предельное значение $k/2\mu_0$ равно $1,75$, а влияние «краевого эффекта» пренебрежимо мало.

Наибольший интерес представляют результаты, приведенные на рис. 4. Здесь параметр $k/2\mu_0$, равный $3,5$ — максимальный из трех рассмотренных случаев. Причем верхние части графиков (до разрыва) близки к соответствующим графикам на рис. 3, так как при этом z_1 регистрируется на начальном участке сигнала из однородной атмосферы, а влияние сигнала от облака относительно невелико. Следовательно, в совершенно однородной атмосфере для этих двух случаев z_1 будет одинаково.

Наличие разрыва на графиках обусловлено скачкообразным увеличением z_1 (углублением в облако), когда $S(z_n)$ становится больше $S(z_0)n$. В результате диапазон z_1 вблизи максимума импульса от облака не реализуется, а рассматриваемая погрешность максимальна именно для этого диапазона.

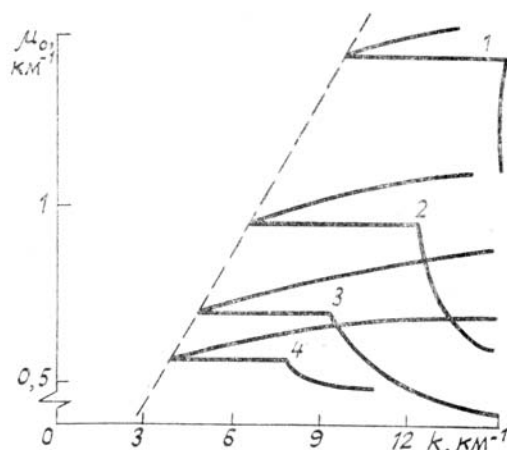


Рис. 4. Сечения поверхности постоянной погрешности ($\delta\bar{\mu} = -15\%$) плоскостями $z_n = \text{const}$ в координатах k и μ_0 . Фиксированное отношение амплитуд. $z_n = 0,8$ км (1), 1,2 (2), 1,6 (3), 2 (4)

Таким образом, с точки зрения увеличения вероятности измерений с заданной погрешностью из-за непостоянства параметра индикатрисы g_π предпочтительной является реализация в лидаре интегрального метода с фиксацией измерительной базы по спаду сигнала рассеяния в заданное число раз.

1. Жильцов В.И., Козинцев В.И., Константинов Б.А. и др. //Электронная промышленность. 1983. № 3. С. 3–7.
2. Балдёнков Г.Н., Дулькин В.М., Константинов Б.А. и др. //VIII Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Томск. 1984. Ч. 2. С. 349–352.
3. Lewis L. //7th Conf. Aerospace and Aeronaut. Met. and Symp. Remout Sens, from Sat. Melbourne, 1976. P. 237–241.
4. Минервин В.Е. //Тр. ЦАО. 1982. Вып. 148. С. 81–91.
5. Гольберг М.А. //Тр. НИИГМП. 1971. Вып. 25. С. 26–29.
6. Ковалев В.А., Балдёнков Г.Н., Козинцев В.И. //Изв. АН СССР. ФАО. 1987. Т. 23. № 6. С. 611–615.
7. Ковалев В.А. //Тр. ГГО. 1973. Вып. 312. С. 128–133.

Поступила в редакцию
29 ноября 1988 г.

G. N. Baldenkov, V. I. Kozintsev, E. E. Mozharov. **On Atmospheric Extinction Coefficient Lidar Measure Errors Due to Phase Function Changeability.**

The article is devoted to model computations results analysis of mean extinction coefficient measure errors due to phase function changeability in case of cloud existence on measuring path. Three ways of measuring distance definition are observed. It is shown that from these errors minimization point of view the way of measuring distance definition by backscatter signal reduction is the best.