

Г.В. Коларов

ВКЛАД ПРЕДЫДУЩИХ ЗОНДИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ В ОШИБКУ ЛИДАРНОГО СИГНАЛА

Рассматривается систематическая ошибка лидарного сигнала за счет добавления откликов от предыдущих лазерных импульсов серии. Показана зависимость вертикальных и горизонтальных профилей этой ошибки от частоты повторения импульсов, прозрачности атмосферы и от числа предыдущих зондирующих импульсов.

Происхождение и характеристики случайных ошибок лидарных сигналов исследовались многими авторами [1–4]. Тем не менее не существует универсальной методологии анализа систематических ошибок сигналов, связанных с неточностью модели зондирования. Одна из причин таких ошибок — добавление к полезному сигналу как отклику на некий лазерный импульс откликов на ранее излученные импульсы. В общем эта ошибка растет с увеличением частоты повторения и при высоком ее значении (лазеры на азоте, на парах металлов, диодные и др.) может стать существенной и потребовать внесения поправки.

Проведем анализ ошибки и сделаем ее оценку. Обычное лидарное уравнение

$$P(z) = Az^{-2\beta}(z) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right] \quad (1)$$

(A — аппаратная константа, β , α — коэффициенты обратного рассеяния и ослабления) задает мощность принимаемого сигнала с дальности z , обусловленного рассеянием назад κ -го лазерного импульса. Одновременно на фотодетектор поступают сигналы с дальностями $z + nz_\Theta$, $n = 1, 2, \dots$, обусловленные рассеянием $\kappa - 1$ -го, $\kappa - 2$ -го и т. д. импульсов лазера, где $z_\Theta = c/2f_\lambda$, f_λ — частота повторения лазера. Мощности этих добавок также определяются уравнением (1) при замене z на $z + nz_\Theta$ так что суммарная мощность из зоны однозначности $z \leq z_\Theta$ равна:

$$P_\Sigma(z) = \sum_{n=0}^{\infty} P_n(z), \quad (2)$$

где

$$P_n(z) = Az_n^{-2\beta}(z_n) Y(0, z_n),$$

$z_n = z + nz_\Theta$, $Y(z_a, z_b)$ — прозрачность двойного пути от z_a до z_b . В (2) слагаемое P_0 — полезный сигнал, сумма остальных формирует ошибку.

Относительная ошибка равна

$$\varepsilon(z) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n(z)/P_0(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{z_n}{z} \right)^{-2\beta} \frac{\beta(z_n)}{\beta(z)} Y(z, z_n), \quad (3)$$

1-й и 3-й множители в правой части (3) убывают с ростом n , отношение $\beta(z_n)/\beta(z)$ сложно зависит от n , z , например, из-за аэрозольных неоднородностей вне зоны $(0, z_\Theta)$. Заметим также, что $(z_n/z)^{-2} \leq (1+n)^{-2}$, $Y(z, z_n) < 1$.

Анализ $\varepsilon(z)$ во всем многообразии возможного поведения $\alpha(z)$ и $\beta(z)$ затруднителен, поэтому проведем его в двух частных случаях: вертикальное зондирование в слабо замутненной атмосфере (модель [5] при метеорологической дальности видимости $S_m = 23$ км) и горизонтальное зондирование (в предположении горизонтальной однородности). В последнем случае

$$\varepsilon(z) = \sum_{n=1}^{\infty} (1 + nz_\Theta/z)^{-2} \exp[-2\alpha n z_\Theta],$$

достигая максимума при $z = z_0$, равного

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon(z_0) = \sum_{n=1}^{\infty} (1+n)^{-2} \exp(-2nz_0),$$

и превышающего значение 0,25 при достаточно малых α .

Во всех случаях ε зависит от f_L , тем самым — от z_0 , поэтому на рис. 1 и 2 даны зависимости от z/z_0 . Другой фактор, от которого зависит ε — профиль $\alpha(z)$, в частности, $\alpha(0)$ и тем самым S_M . Наконец, ε зависит от $\beta(z)$.

В случае вертикального зондирования (рис. 1) при $f_L = 5, 15, 30$ кГц ($z_0 = 30, 10, 5$ км) ε_{\max} составляет 1,2; 9; 17,5%, причем в случае $f_L = 15$ кГц максимальная ε достигается ниже высоты $z_0 = 10$ км зоны однозначности, что объясняется влиянием стратосферного аэрозольного слоя Юнге.

В случае горизонтального зондирования (рис. 2) при $f_L = 5, 15, 30$ кГц ε_{\max} составляет 0,06; 3,6; 11,1%, если $\alpha = 0,1$ км⁻¹, и 1,3; 11,1; 21,4%, если $\alpha = 0,05$ км⁻¹.

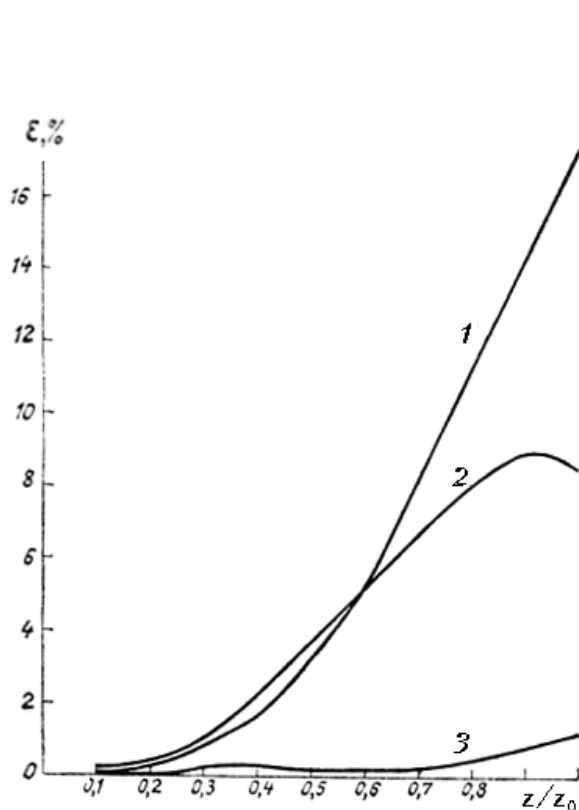


Рис. 1. Зависимость относительной ошибки ε , % от относительной дальности при вертикальном зондировании с Земли на $\lambda = 0,51$ мкм при $S_M = 23$ км для $f_L = 30$ кГц (1), 15 кГц (2), 5 кГц (3)

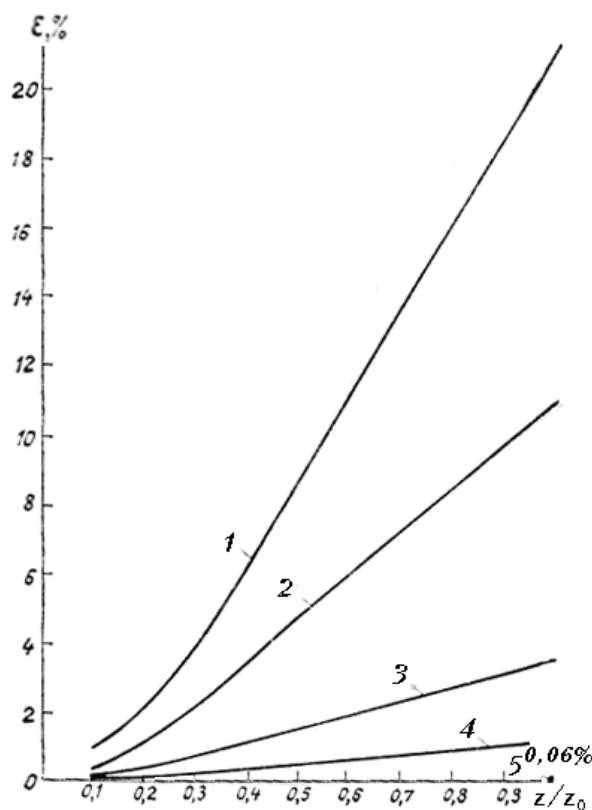


Рис. 2. То же, что на рис. 1, при горизонтальном зондировании в однородном слое на $\lambda = 0,51$ мкм. 1— $S_M = 80$ км, $f_L = 30$ кГц; 2— $S_M = 80$ км, $f_L = 15$ кГц или $S_M = 40$ км, $f_L = 30$ кГц; 3— $S_M = 40$ км, $f_L = 15$ кГц; 4— $S_M = 80$ км, $f_L = 5$ кГц; 5— $S_M = 40$ км, $f_L = 5$ кГц

С увеличением α уменьшается ошибка ε на всех частотах повторения импульсов, и даже на самой большой частоте заметные ε соответствуют $\alpha \leq 0,4$, то есть $S_M \geq 10$ км.

Практически при зондировании аэрозоля с высокой частотой повторения и, следовательно, с небольшой энергией импульса, измерение аэрозольного профиля проводится по серии зондирующих импульсов. Эхо-сигнал 1-го импульса избавлен от изучаемой ошибки, эхо-сигнал 2-го содержит ошибку за счет одного предыдущего, 3-го — за счет двух предыдущих и т.д. Рассматриваемые выше значения ε соответствуют стационарному режиму, то есть тем импульсам, которым предшествует достаточно большое число импульсов серии. В таблице иллюстрируется нарастание ошибки с номером импульса и переход в стационарный режим.

Выводы. В отличие от обычной локации сосредоточенных объектов, где согласование частоты повторения с рабочей дальностью избавляет от появления ложных целей, обусловленных неоднозначностью отсчета дальности, в лидарном зондировании по упругому рассеянию в частотном режиме

имеется положительная ошибка за счет отклика на предыдущие импульсы из зоны неоднозначности отсчета дальности. Однако существенного значения эта ошибка достигает при вертикальном зондировании лишь для частот повторения, больших 5 кГц, а при горизонтальном — для тех же частот и достаточно малых $\alpha \leq 0,4 \text{ км}^{-1}$, что реализуется у Земли при $S_m \geq 10 \text{ км}$, а еще чаще — при зондировании с возвышенности или с самолета. Как показывают расчеты, при неблагоприятных, но реальных условиях относительная ошибка этого вида может составлять более 20%.

Зависимость максимальной по дальности ошибки ε (%) от номера импульса в пачке для горизонтального зондирования

α , км ⁻¹	$f_{\text{л}}$, кГц	Номер эхо-сигнала					
		2	3	4	5	6	7
0,05	30	15,16	19,25	20,64	21,18	21,41	21,51
	15	9,20	10,70	11,01	11,08	11,094	11,1
	5	1,24	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
0,01	30	9,20	10,70	11,01	11,08	11,094	11,1
	15	3,38	3,58	3,59	3,59	3,59	3,59
	5	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

1. Глазов Г. Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 312 с.
2. Стоянов Д. В., Дончев А. К., Коларов Г. В., Мицев Ц. А. // Оптика атмосферы. Т. 1. № 4. 1988. С. 109–117.
3. Russel P. B., Swessler T. J., Mc Cormick M. P. // Appl. Opt. 1979. V. 18. P. 3783–3797
4. Ponthey S. K. // Adv. in Electron, and Electron Phys., 1972. № 31. P. 39–117.
5. Mc Clatchy R. A. et al. // Report AFCRL-71-0279, Environm. Res. Papers, 1971, № 354.

Институт электроники Болгарской академии наук,
София

Поступило в редакцию
13 декабря 1989 г.

G. V. Kolarov. Contribution of Preceding Lidar Returns into the Total Error of Return Signal.

The paper deals with the analysis of a systematic error in lidar return evaluation, which is caused by the photo-counts from preceding lidar returns contributing to the intensity of the succeeding ones. The dependence of vertical and horizontal profiles of this error on the pulse repetition frequency, atmospheric transmission, and number of preceding soundings is obtained.