

Г.Н. Глазов, Г.М. Игонин, Д.М. Лещинский

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗОНДИРОВАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ САМОЛЕТНЫМ КОГЕРЕНТНЫМ ЛИДАРОМ ИК ДИАПАЗОНА С ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ СИГНАЛОВ

На основе марковской модели сглаженных лидарным импульсом высотных флуктуации коэффициента обратного аэрозольного рассеяния $\beta_a(z)$ показана возможность применения оптимальной марковской фильтрации к моноимпульсному одночастотному зондированию аэрозолей самолетным когерентным лидаром ИК диапазона. Найдены алгоритмы оптимальной оценки реализации $\beta_a(z)$ и ее дисперсии. Анализ эффективности зондирования проведен методами численного моделирования для двух гипотетических лидаров с приемлемой энергетикой, зондирующих в надир с высот z_n 9 и 15 км.

В последние годы возрос интерес к оптическим характеристикам аэрозоля в окне прозрачности 9–11 мкм. Они необходимы для выбора параметров и анализа эффективности атмосферно-оптических систем, в частности лидарных [1–4], появляющихся по мере совершенствования CO₂-лазеров, для развития моделей радиационного энергетического баланса [5], исследования физико-химии и динамики крупнодисперсной фракции аэрозоля и других приложений. Хотя в этом диапазоне не были выполнены измерения коэффициента β_a обратного аэрозольного рассеяния лидарами с непрерывным [6, 7] и импульсным [8–12] излучениями, в отличие от видимого диапазона имеется лишь небольшой набор эпизодических локальных данных по β_a для некоторых высот.

Принципиальную возможность изучения тропосферного поля $\beta_a(\mathbf{r}, t)$ в указанном диапазоне предоставляет зондирование с самолета когерентными лидарами [10, 13–15]. Измеряя высотные реализации β_a над различными точками подстилающей поверхности, возможно восстановить как детерминистские, так и статистические характеристики поля β_a над обширными районами.

Возможность моноимпульсного измерения реализации профиля β_a ограничена флуктуациями поля β_a , стохастического по своей природе, и флуктуациями сигналов и помех в последетекторном тракте приемника. Поскольку энергетический потенциал самолетного лидара ограничен, повышение точности измерения β_a может быть достигнуто только путем оптимизации обработки сигналов в приемнике. Возможность такой оптимизации дает аппарат оптимальной марковской фильтрации [16], используемый в случае зондирования термодинамических параметров воздуха в видимом диапазоне [17, 18].

В данной работе определяются алгоритмы оптимальной обработки в гетеродинном приемнике самолетного лидара на CO₂-лазере, позволяющей в каждом акте зондирования измерить флуктуационную часть реализации высотного профиля при заданном среднем профиле и автоматически оценить точность измерения, затем с помощью моделирования на ЭВМ изучается эффективность такого зондирования.

Рассмотрим самолетный лидар на высоте z_n , зондирующий в надир ($z = z_n - ct/2$) или в зенит ($z = z_n + ct/2$) на длине волны $\lambda = 9-11$ мкм импульсами с энергией E , эффективной длительностью τ_n и мощностью $P_n(t)$ (z, t – текущие высота и время). Мощность сигнала на входе детектора

$$P_{пр}(z) = (c/2) S_a \kappa_1 E (z - z_n)^{-2} \beta_a(z) Y^2(z, z_n), \quad (1)$$

где S_a – эффективная площадь приемного зеркала; κ_1 – коэффициент потерь в приемной оптике; $\beta_a(z)$ – сглаженный лидарным импульсом профиль [17]; $Y(z, z_n)$ – пропускание от z_n до z . Если несглаженный случайный профиль $\beta_a^u(z)$ гауссов или если

$$c\tau_n/2 \gg z_n^3 \quad (2)$$

(z_n^3 – вертикальный радиус корреляции процесса β_a^u), то $\beta_a(z)$ – гауссов. Согласно оценкам [19], (2) выполняется при $\tau_n \geq 2$ мкс. Если при условии (2) $P_n(t) = P_n(0)\exp\{-at\}$, то спектральная плотность процесса $\beta_a(ct/2)$ имеет вид

$$F(\omega) = G/(\alpha^2 + \omega^2), \quad (3)$$

в противном случае примем (3) как аппроксимацию.

Запишем $\beta_a(z) = \beta_a(z) + \Delta\beta_a(z)$ и выберем переменную состояния в виде $\eta(t) = \Delta\beta_a/\sigma(\beta_a)$, где σ означает среднеквадратичное отклонение. Тогда при гауссовом $\beta_a(z)$ и выполнении (3) $\eta(t)$ — простой марковский процесс [20], удовлетворяющий уравнению

$$\dot{\eta}(t) = -\alpha\eta(t) + \omega(t),$$

где $\omega(t)$ — белый шум со спектральной плотностью $W/2 = 2\alpha$, причем $\eta = 0$, $\sigma(\eta) = 1$. Ток на выходе фильтра промежуточных частот с полосой Π имеет вид

$$y(t) = s(t, \eta) + n(t),$$

где

$$s(t; \eta) = s_0(t) \sqrt{1 + m_\beta^2 \eta^2} \cos[\Omega t + \Theta_s(t)] \quad (4)$$

— сигнальная часть;

$$s_0(t) = 2\chi_2 K_d q_e (h\nu)^{-1} [\bar{P}_{\text{пр}}(ct/2) P_r]^{1/2}; \quad (5)$$

$m_\beta = \sigma(\beta_a)/\bar{\beta}_a$; Ω — промежуточная частота; $\Theta_s = \Theta_{\text{пр}} - \Theta_r$, $\Theta_{\text{пр}}$ — флуктуирующая (в частности, из-за турбулентности на трассе) фаза сигнала; Θ_r — флуктуирующая фаза гетеродина; K_d , χ_2 — коэффициент усиления и квантовая эффективность фотодетектора; q_e — заряд электрона; $h\nu$ — энергия кванта принимаемого света; P_r — мощность излучения гетеродина на детекторе, предполагаемая неизменной на протяжении эхо-сигнала; $n(t)$ — шумовая часть, обусловленная дробовыми шумами гетеродина, сигнала и фона: при $\Pi \gg 2\alpha$ и $P_r \gg P_{\text{пр}} n(t)$ — белый гауссовский шум со спектральной плотностью

$$N = 2q_e^2 \chi_2 K_d P_r / h\nu. \quad (6)$$

Задача обработки в приемнике сводится к оптимальному оцениванию реализаций $\eta(t)$ по входным данным $y(t)$ при априорно заданных функциях $\bar{\beta}_a(z)$, $Y(z, z_r)$ и параметрах W , N , m_β , α . В гауссовском приближении апостериорной плотности вероятности $f(\eta/y)$ уравнения для квазиоптимальной оценки $\eta^*(t)$ и ее дисперсии $K(t)$ имеют следующий вид [16]:

$$\dot{\eta}^* = -\alpha\eta^* + \frac{2K}{N} \left(\frac{\partial s}{\partial \eta} \right)_{\eta=\eta^*} [y(t) - s(t; \eta^*)]; \quad (7)$$

$$\dot{K} = -2\alpha K + 2\alpha - 2K^2 \left(\frac{\partial s}{\partial \eta} \right)_{\eta=\eta^*}^2 / N. \quad (8)$$

Пусть в интервале фильтрации $[z_0, z_m]$ выполняется условие

$$\frac{s_0^2}{\sigma^2(n)} = \chi_2 K_d P_{\text{пр}}(ct/2) / h\nu \cdot \alpha \gg 1.$$

Тогда, записывая $y(t) = y_m \cos[\Omega t + \Theta_y(t)]$ и пренебрегая осцилляциями частоты 2Ω , поскольку они подавляются фильтром промежуточной частоты, получаем $y \cos[\Omega t + \Theta_s] \approx y_m/2$, и уравнения (7), (8) принимают вид

$$\dot{\eta}^* = -\alpha\eta^* + \frac{K m_\beta s_0}{2N} \left(\frac{y_m}{\sqrt{1 + m_\beta^2 \eta^{*2}}} - s_0 \right); \quad (9)$$

$$\dot{K} = -2\alpha K + 2\alpha - \frac{K^2 m_\beta^2 s_0^2}{4N(1 + m_\beta^2 \eta^{*2})}. \quad (10)$$

Рекуррентное конечно-разностное решение этой системы уравнений (например, методом Рунге—Кутты) при начальных условиях $\eta^*(z_0) = 0$, $K(z_0) = 1$ по мере поступления выборочных данных, т.е.

огнбающей $y_m(t)$, для получения которой достаточно установить в тракте промежуточной частоты амплитудный детектор, дает оптимальную оценку $\eta^*(t)$, тем самым — оценку профиля $\beta_a(z)$:

$$\beta_a^*(z) = \bar{\beta}_a(z) [1 + m_{\bar{\beta}} \eta^* (\mp 2(z - z_n)/c)],$$

и оценку $K(t)$ дисперсии функции $\eta^*(t)$, тем самым — дисперсии $D[\beta_a^*(z)] = \sigma^2[\beta_a(z)]K(\mp 2(z - z_n)/c)$ профиля $\beta_a^*(z)$.

Если $m_{\bar{\beta}}^2 \ll 1$, то (9), (10) линеаризуются относительно η^* , поскольку $\sigma(\eta^*) \leq 1$. При более сильном условии $m_{\bar{\beta}} \ll 1$ система еще более упрощается:

$$\dot{\eta}^* = -\alpha \eta^* + Km_{\bar{\beta}}s_0(y_m - s_0)/4N; \quad (11)$$

$$\dot{K} = -2\alpha K + 2\alpha - K^2 m_{\bar{\beta}}^2 s_0^2 / 4N, \quad (12)$$

причем (12) имеет вид уравнения Риккати, не зависит от выборочных данных и может быть решено априори, после чего (11) может быть решено как конечно-разностным методом, так и по формуле [21]

$$\eta^*(t) = \frac{1}{2N} \exp(-\alpha t) \int_{t_0}^t m_{\bar{\beta}} s_0 (y_m - s_0) K \exp(\alpha t') dt'.$$

В качестве меры локальной ошибки оценки реализации $\beta_a(z)$ на высоте $z \in [z_0, z_m]$ примем $\sigma(\beta_a^*) = \sigma(\beta_a) \sqrt{K}$. Введя обобщенное время $\varkappa = \alpha t$, запишем (12) в виде

$$dK/d\varkappa = -2K + 2 - QK^2, \quad (13)$$

где

$$Q = m_{\bar{\beta}}^2 s_0^2 / 4N\alpha \quad (14)$$

— обобщенное отношение сигнал—шум ($m_{\bar{\beta}}^2$ — относительная априорная дисперсия $\beta_a(z)$; $s_0^2 / 4N\alpha$ — обычное отношение сигнал — шум, поскольку $s_0^2 / 2$ — квадрат эффективного тока сигнала; а $2N\alpha$ — дисперсия шума $n(t)$ в полосе 2α сигнала). Обозначив $\delta = \sigma(\beta_a^*) / \sigma(\beta_a) = \sqrt{K}$, из (13) имеем уравнение для δ :

$$d\delta/d\varkappa = -\delta + \delta - Q\delta^3/2 \quad (15)$$

с начальным условием $\delta(\varkappa_0) = 1$. Как единственный параметр уравнений (13) и (15) $Q(z)$ полностью определяет динамику локальной ошибки на интервале $[z_0, z_m]$ фильтрации, в то время как α определяет пространственное разрешение: разрешаемый масштаб неоднородности β_a вдоль трассы зондирования — порядка $L = c/2\alpha$.

Численное решение уравнения (13) в интервале $[\varkappa_0, \varkappa_m]$ для реальных зависимостей $Q(z)$ при начальном условии $K(\varkappa_0) = 1$ показывает [17], что при $Q_0 = Q(z_0) \gg 1$ и зондировании в зенит $K(\varkappa)$ быстро (на интервале $\Delta\varkappa_* = \varkappa_* - \varkappa_0 \ll 1$) спадает до минимального значения $K_* = K(\varkappa_*)$, затем медленно нарастает по мере уменьшения Q . В силу названных неравенств из (13) следует

$$K_* \simeq \sqrt{2}/\sqrt{Q_0} - 1/Q_0, \quad Q_0 \gg 1. \quad (16)$$

При зондировании в надир может оказаться, что Q монотонно нарастает на $[\varkappa_0, \varkappa_m]$. Тогда при $Q_0 \gg 1$ $K(\varkappa)$ сначала быстро (на $\Delta\varkappa_{**} = \Delta\varkappa_*$) достигает значения $K_{**} = K_*$, затем медленно продолжает спадать.

Рассмотрим эффективность зондирования в надир на примере двух гипотетических самолетных гетеродинных лидаров (табл. 1).

Параметры гипотетических лидаров

Лидар	E , Дж	S_a , м ²	K_d	χ_1	χ_2	λ , мкм	z_l , км	z_0 , км
А	0,1	0,07	1	0,25	0,5	10,59	9	8
Б	0,2	0,126	1	0,25	0,5	10,59	15	14

В силу (5), (6), (14) можно записать $Q = (\chi_2 K_d / chv) P_{np} p$, где $p = m_b^2 L$. Воспользовавшись моделью аэрозольного рассеяния [4] для $\lambda = 10,6$ мкм и моделью молекулярного поглощения [22] для перехода P20 CO₂-лазера ($\lambda = 10,591$ мкм), можно рассчитать зависимости $Q(z)$ для $\lambda = 10,6$ мкм и моделью молекулярного поглощения [22] для перехода P20 CO₂-лазера ($\lambda = 10,591$ мкм), можно рассчитать зависимости $Q(z)$ для обоих лидаров при различных значениях p . Такие зависимости при $p = 5$ м (например, $m_b = 0,1$, $L = 500$ м) приведены на рис. 1 для двух сезонов. Двойная перемена монотонности обусловлена взаимодействием факторов $\beta_a(z)$, $(z - z_l)^2$, $Y^2(z, z_l)$ лидарного уравнения (1). Очевидно, что во всех случаях при $p \geq 5$ выполняется условие эффективной фильтрации $Q(z) \gg 1$.

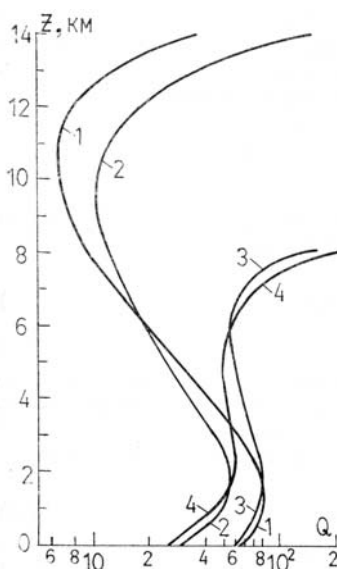


Рис. 1. Профили обобщенного отношения сигнал–шум Q при зондировании в надир лидарами А (3, 4), Б (1, 2) для лета (2, 4) и зимы (1, 3) средних широт; $p = 5$ м

На рис. 2, 3 приведены результаты численного расчета профиля отношения $K = \sigma^2(\beta_a^*) / \sigma^2(\beta_a)$ апостериорной и априорной дисперсий для лидаров А, Б, различных разрешений L и относительных флуктуации m_b флуктуации профилей β_a . $K(z)$ после быстрого спада от $K(z_0) = 1$ до K_* качественно повторяет профиль обратного отношения $Q^{-1}(z)$. Очевидно, оптимальная фильтрация имеет смысл лишь для тех высот, где K существенно меньше чем 1, поскольку априори заданный профиль $\bar{\beta}_a$ можно рассматривать как тривиальную оценку реализации β_a с дисперсией, равной априорной $\sigma(\beta_a)$, т.е. с $K(z) \equiv 1$. Естественно, что в силу (13), (14) K находится в обратной зависимости от m_b , т.е. глубины флуктуации β_a , и от L , т.е. разрешаемого масштаба неоднородностей. Согласно рис. 2 и 3 при всех выбранных m_b , L лидары А, Б обеспечивают в интервалах фильтрации значения $K < 0,3$ и $0,4$ соответственно.

Кроме локальных критериев ошибки $\sigma(\beta_a^*)$ или K , полезно иметь глобальный критерий качества фильтрации на выбранном интервале. Один из таких возможных критериев имеет вид

$$M = \left[\frac{1}{(z_m - z_0)} \int_{z_0}^{z_m} K(z) dz \right]^{-1/2}.$$

В табл. 2 приведены значения M , достигаемые лидарами А и Б, при тех значениях p , для которых рассчитаны кривые рис. 2, 3. Заметим, что как следует из (16), минимальная локальная ошибка $\sigma^*(\beta_a^*) \sim Q^{-1/4}$, и как следует из табл. 2, $M \sim Q_0^{1/4}$. Тривиальной оценке соответствует $M = 1$.

Таблица 2

Глобальный критерий M качества фильтрации лидаров А, Б для различных значений $p = m_b^2 L$

$p, м$	Лидар А						Лидар Б					
	3	5	12	20	27	45	5	7	20	28	45	63
M	2,2	2,4	3	3,4	3,6	4,1	2	2,1	2,7	2,9	3,3	3,5

Таким образом, возможности моноимпульсного зондирования флуктуирующего профиля β_a зависят от обобщенного параметра Q , определяемого средним профилем $\bar{\beta}_a(z)$ глубиной флуктуации m_b , энергетическим параметром лидара $S_a E$, уровнем шума приемника и пространственным разрешением. Приведенные результаты позволяют определить локальную или глобальную эффективность для заданного самолетного когерентного лидара, а также выбрать параметры лидара для достижения заданных точности и разрешающей способности.

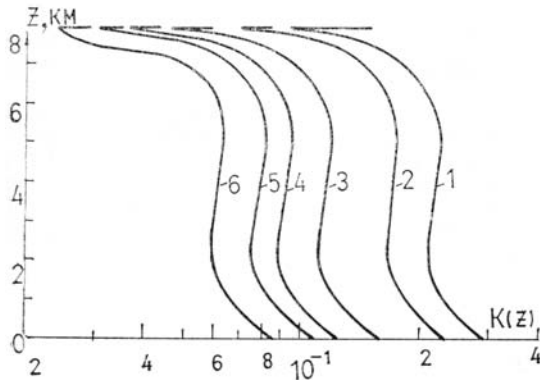


Рис. 2. Профили K при зондировании в надир лидаром А для $m_b = 0,1$, $L = 300 м$ (1), $500 м$ (2); $m_b = 0,2$, $L = 300 м$ (3), $500 м$ (4); $m_b = 0,3$, $L = 300 м$ (5), $500 м$ (6)

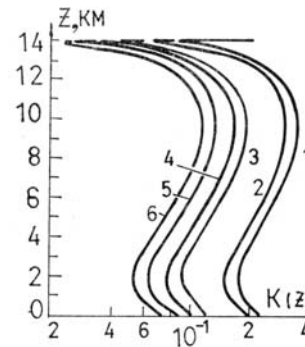


Рис. 3. Профили K при зондировании в надир лидаром Б для $m_b = 0,1$, $L = 500 м$ (1), $700 м$ (2); $m_b = 0,2$, $L = 500 м$ (3), $700 м$ (4); $m_b = 0,3$, $L = 500 м$ (5), $L = 700 м$ (6)

1. Берсенов В.И., Приезжев А.В. Доплеровские лидары для измерения скорости ветра. — Деп. в ВИНТИ, № 7988—В—85, 1985. — 52 с.
2. Menyuk N., Killinger D.K. — Appl. Optics, 1983, v. 22, N. 17, p. 2690—2697.
3. Post M.J. — Appl. Optics, 1979, v. 18, № 15, p. 2645—2653.
4. Huffaker R.M., Lawrence T.R., Post M.J. et al. — Appl. Optics, 1984, v. 23, No. 15, p. 2523—2536.
5. Herman B.M., Browning S.R. — J. Atm. Sci., 1975, v. 32, p. 1430.
6. Schwiesow R.L., Cupp R.E., Derr V.E. et al. — J. Appl. Meteorol., 1981, v. 20, p. 184.
7. Jones W.D. — Technical Digest «Second Topical Meeting on Coherent Laser Radar: Technology and Application». Washington, D.C: Optical Society of America, 1983, ThB5.
8. Menzies R.T., Kavaya M.J., Flamant P.H., Haner D.A. — Appl. Optics, 1984, v. 23, N. 15, p. 2510—2517.
9. Post M.J., Hall F.F., Richter R.A., Lawrence T.R. — Appl. Optics, 1982, v. 21, N. 13, p. 2442—2446.
10. Vaughan J.M., Woodfield A.A. — Technical Digest «Topical Meeting on Optical Remote Sensing of the Atmosphere». Washington, D. C: Optical Society of America, 1985, WC21.
11. Post M.J. — Appl. Optics, 1984, v. 23, № 15, p. 2507—2509.
12. Rothermel J., Jones W.D. — Appl. Optics, 1984, v. 24, № 21, p. 3487—3496.
13. Hardesty R.M. — Appl. Optics, 1984, v. 23, № 15, p. 2545—2553.
14. Post M.J. — Opt. Lett., 1978, v. 2, p. 166.
15. Bilbo J., Fichtle G., Fitzgerald D., Krause M., Lee R. — Bull. Am. Meteorol. Soc., 1984, v. 65, p. 348—359.
16. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. — М.: Радио и связь, 1983. — 319 с.
17. Глазов Г.Н., Глазов Гр.Н., Игонин Г.М. — Автометрия, 1985, № 5, с. 46—51.

18. Глазов Г.Н., Игонин Г.М. — Исследование Земли из космоса, 1987, № 2, с. 51—56.
19. Матвиенко Г.Г., Задде Г.О., Фердинандов Э.С. и др. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра — Новосибирск-Наука, 1985. — 223 с.
20. Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуации в радиотехнике. — М.: Советское радио, 1961. — 558 с.
21. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям — М.: Наука, 1965. — 703 с.
22. Макушкин Ю.С., Мицель А.А., Руденко В.П., Фирсов К.М. — В сб.: Опτικο-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987, с. 63—78.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, г. Томск

Поступила в редакцию
29 декабря 1987 г.

G. N. Glazov, G. M. Igonin, D. M. Leshchinsky. Capabilities of Airborne Coherent IR Lidar with Optimal Signal Filtration for Atmospheric Aerosol Sounding.

The applicability of optimal Markovian filtration for mono-pulse single-frequency aerosol sounding using an airborne coherent IR-lidar based on the Markovian model of altitude fluctuations of aerosol backscattering coefficient $\beta_a(z)$ smoothed by a laser pulse is discussed. The algorithms of optimal estimation on the $\beta_a(z)$ realization and its variance are derived. The sounding efficiency is analysed by means of numerical simulations for two ideal lidars with a moderate energy potential for nadir sounding from altitudes 9 and 15 km.