

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 535.361 : 551.508.8

Б.В. Кауль

ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИДАРОВ

Приведены формулы, удобные для оценок эффективности лидарных систем в задачах лазерного зондирования атмосферы.

Качество лидара определяется всего тремя обобщенными параметрами. Показано, что для конкретной лидарной системы может быть построено однопараметрическое семейство характеристик, полностью описывающих возможности лидара при работе в условиях помех фона.

Пригодность лидара для решения той или иной атмосферной задачи оценивают путем сравнения ожидаемых флуктуаций сигнала и фона со средним уровнем сигнала, рассчитанным из уравнения лазерной локации. Цель сравнения — получение оценки точности измерения сигнала за приемлемый промежуток времени. Если при этом попытаться оптимизировать параметры лидара, то возникает необходимость варьировать большим их количеством. Но, как будет показано, лидарную систему можно полностью описать тремя обобщенными параметрами, если задачу измерений с помощью лидара характеризовать сформулированными ниже терминами.

В любой задаче лазерного зондирования атмосферы в качестве цели выступает ансамбль рассеивающих частиц. Его локационные свойства описываются сечением обратного рассеяния единицы объема, то есть коэффициентом обратного рассеяния $\beta\pi$. Цель находится на расстоянии r от лидара, а условия прохождения излучения до цели и обратно задаются прозрачностью $T(r)$ интервала трассы $[0, r]$. В качестве обобщенной характеристики цели логично взять комбинацию указанных величин в том виде, в каком они входят в уравнение лазерного зондирования

$$\rho(r, \lambda) = \beta\pi(r, \lambda) T^2(r, \lambda)/r^2. \quad (1)$$

Если рассеяние происходит на длине волны λ_1 , отличной от длины волны передатчика, то вместо $T^2(r, \lambda)$ следует взять произведение $T(r, \lambda) T(r, \lambda_1)$.

В лазерной локации атмосферы цель рассредоточена вдоль трассы, а сведения о распределении ее структурных неоднородностей составляют часть полезной информации. Степень детализации определяется пространственным разрешением

$$\Delta r = c\Delta\tau/2, \quad (2)$$

где c — скорость света, а $\Delta\tau$ — временной интервал усреднения. Его минимальное значение определяется длительностью лазерного импульса. При регистрации слабых сигналов $\Delta\tau$ имеет смысл интервала аппаратурного интегрирования и определяется как компромисс между необходимой пространственной детализацией и достаточной точностью измерений.

Погрешность измерения сигнала связана с отношением сигнал-шум ξ . По определению [1]

$$\xi^2 = I_c^2/D(I_n), \quad (3)$$

где I_c^2 — средний ток сигнала, а $D(I_n)$ — дисперсия полного тока приемника, включающего сигнал и шумы. В лидарном эксперименте желательно и обычно осуществляется измерение среднего тока (или скорости счета) шумов. Это делается в промежутках между сигнальными импульсами. Тогда $I_c = I_n - I_{ш}$. Относительную ошибку измерения сигнала $\delta I_c = \sqrt{D(I_c)}/I_c$ можно найти через измеряемые величины:

$$\delta I_c = \sqrt{D(I_n) + D(I_{ш})}/(I_n - I_{ш}). \quad (4)$$

В режиме счета фотонов с накоплением по k посылкам лазерных импульсов оценка I_n и $I_{ш}$ дается соотношениями

$$I_{\text{п}} = e\mu N_{\text{п}}/\kappa\Delta\tau_{\text{с}}; \quad I_{\text{ш}} = e\mu N_{\text{ш}}/\kappa\Delta\tau_{\text{ш}},$$

где $N_{\text{п}}$ и $N_{\text{ш}}$ – числа фотоотчетов, накопленные в сигнальном и фоновом stroбах с длительностью соответственно $\Delta\tau_{\text{с}}$ и $\Delta\tau_{\text{ш}}$; μ – коэффициент умножения; e – заряд электрона.

Формула (4) преобразуется к виду

$$\delta I_{\text{с}} = \sqrt{\frac{D(N_{\text{п}})}{\Delta\tau_{\text{с}}^2} + \frac{D(N_{\text{ш}})}{\Delta\tau_{\text{ш}}^2}} \left/ \left(\frac{N_{\text{п}}}{\Delta\tau_{\text{с}}} + \frac{N_{\text{ш}}}{\Delta\tau_{\text{ш}}} \right) \right. . \quad (5)$$

Если флуктуации сигнала и шумов описываются распределением Пуассона, а $\Delta\tau_{\text{с}} = \Delta\tau_{\text{ш}}$, то (5) принимает вид

$$\delta I_{\text{с}} = \sqrt{N_{\text{п}} + N_{\text{ш}}} / (N_{\text{п}} - N_{\text{ш}}). \quad (6)$$

Нетрудно убедиться, что при $\xi \approx 10$; для (4–6) выполняется приближенное равенство

$$\delta I_{\text{с}} = \xi^{-1},$$

т.е. отношение сигнал-шум вполне определенно характеризует точность измерения сигнала.

Обычно только в условиях ночного фона флуктуации сигнала и собственные шумы детектора могут быть сравнимы или превышать шум внешней засветки. Поэтому спектральную яркость фона B_{λ} следует рассматривать как характеристику, описывающую условия проведения эксперимента.

В качестве последней характеристики процесса измерения определим величину F как частоту возобновления сведений. Она является величиной, обратной времени, которое необходимо для получения сигнала с заданным отношением сигнал-шум. Эта характеристика удобна для оценки пригодности лидара в исследовании нестационарных или периодических процессов в атмосфере. Кроме того, она может быть использована как количественный критерий при сравнении различных лидарных систем, поскольку при заданных ρ , Δr , ξ , B_{λ} более эффективен тот лидар, который обеспечивает большее F .

В работе [2] приведена формула, связывающая параметры лидарной системы и характеристику цели с отношением сигнал-шум. После преобразований ее можно привести к следующему виду:

$$F = 2\Delta r \xi^{-2} \rho K_1 [1 + B_{\lambda} K_2 / \rho + K_3 / \rho], \quad (7)$$

где F , Δr , ξ , ρ , B_{λ} – определенные выше характеристики эксперимента, а K_1 , K_2 , K_3 – обобщенные параметры лидара, зависящие только от параметров составляющих его элементов и универсальных физических констант.

Параметр K_1 , входящий в (7) общим множителем, можно условно назвать энергетическим потенциалом лидара. Он определяется следующей формулой:

$$K_1 = E f \eta S / h\nu (1 + \kappa^{-1}), \quad (8)$$

где E – энергия импульса передатчика; f – частота их повторения; S – площадь приемной антенны; η – коэффициент пропускания оптического тракта, включая потери на передающей антенне; $h\nu$ – энергия кванта; κ – квантовая эффективность детектора. Величина K_1 определяет частоту возобновления сведений F при больших значениях характеристики цели ρ , пока выполняются условия

$$B_{\lambda} K_2 / \rho \ll 1; \quad K_3 / \rho \ll 1. \quad (9)$$

Фактор влияния внешних засветок K_2 выражается через параметры лидарной системы формулой

$$K_2 = \Omega \Delta\lambda / c E, \quad (10)$$

где Ω – телесный угол, определяемый шириной диаграммы направленности приемной антенны; $\Delta\lambda$ – спектральная полоса пропускания оптического тракта приемника; c – скорость света. Результаты измерений тем слабее зависят от внешних засветок, чем меньше фактор K_2 лидарной системы.

Фактор внутренних шумов K_3 определяется следующей формулой:

$$K_3 = h\nu n_{\text{т}} / c (\kappa^2 + \kappa) E \cdot \eta \cdot S, \quad (11)$$

где $n_{\text{т}}$ – средняя скорость поступления темновых импульсов фотодетектора.

Рассмотрим функцию

$$F'(\rho) = 2\rho K_1 [1 + B_\lambda K_2/\rho + K_3/\rho]^2, \quad (12)$$

имеющую смысл частоты возобновления сведений при единичном отношении сигнал-шум и $\Delta r = 1$ м. Из нее может быть получено параметрическое семейство $F'(\rho, B_\lambda)$, которое в сформулированных выше терминах дает полное описание лидарной системы. На рис. 1 представлен пример семейства характеристик $F'(\rho, B_\lambda)$, рассчитанных для лидарной системы с параметрами, указанными в подписи к рисунку. Там же для наглядности дана шкала высот, которым соответствуют значения обобщенного параметра цели ρ , если в качестве таковой выступает стандартная молекулярная атмосфера.

Для нахождения частоты возобновления сведений о цели с характеристикой ρ при помощи лидарной системы с обобщенными параметрами K_1, K_2, K_3 необходимо на семейство характеристик по заданным ρ и B_λ найти $F'(\rho, B_\lambda)$ и вычислить величину

$$F = \Delta r \xi^{-2} F'(\rho, B_\lambda). \quad (13)$$

Формулы (7–12) позволяют достаточно наглядно представить роль того или иного параметра лидарной системы при работе в условиях фоновых засветок. Для сохранения величины F при уменьшении характеристики цели нужно прежде всего увеличивать обобщенный параметр системы K_1 . Из определения (8) ясно, улучшением каких параметров аппаратуры этого можно добиться. Следует особо остановиться на соотношении средней мощности передатчика и его импульсной энергии. Для каждой конкретной лидарной системы существует область значений ρ , определяемая условиями (9), где одинаково эффективно увеличение средней мощности, как за счет увеличения частоты, так и за счет увеличения энергии импульса. Но по мере уменьшения ρ увеличение энергии импульса становится предпочтительнее. Эта ситуация наступает тем раньше, чем выше уровень фоновых засветок и чем больше параметр K_2 системы. Здесь уместно отметить, что, как следует из (8, 10, 11), энергия импульса является единственным параметром установки, увеличение которого ведет к одновременному улучшению всех трех обобщенных параметров — максимизируется K_1 и минимизируются K_2 и K_3 .

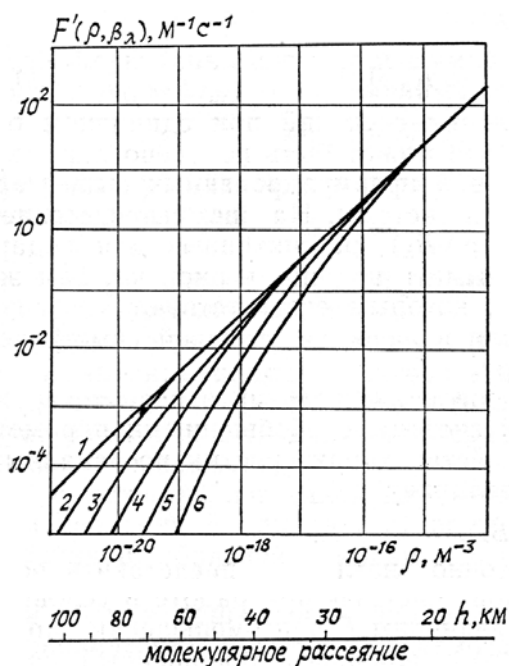


Рис. 1. Зависимость F' — частоты возобновления сведений с единичным отношением сигнал-шум и пространственным разрешением $\Delta r = 1$ м от обобщенного параметра цели ρ и спектральной яркости фона B_λ для лидара, имеющего следующие параметры: $\lambda = 532$ нм, $E = 1$ Дж, $f = 1$ Гц, $S = 1$ м², $\alpha = 0,05$, $\eta = 0,1$, $\Delta\lambda = 1$ нм, $\Omega = 8 \cdot 10^{-7}$ ср ($\varphi = 1$ мр), $n_t = 2 \cdot 10^2$ с⁻¹ (обозначения по тексту). Обобщенные параметры лидара: $K_1 = 1,36 \cdot 10^{16}$ м² с⁻¹, $K_2 = 2,1 \cdot 10^{-18}$ Вт⁻¹ ср · мкм · м⁻¹, $K_3 = 4,7 \cdot 10^{-23}$ м⁻³. Линиям 1–6 соответствуют $B_\lambda = 10^{-6}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 10^0, 10^1$ Вт/м² ср · мкм

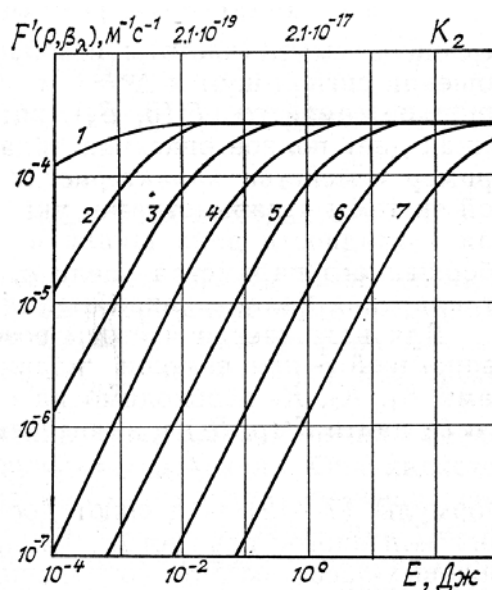


Рис. 2. Зависимость частоты возобновления сведений $F'(\rho, B_\lambda)$ от энергии импульса лазера при постоянной средней мощности. Линиям 1–7 соответствуют $B_\lambda = 10^{-6}; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}; 10^0$. Размерность параметра K_2 — ср · мкм · Вт⁻¹ м⁻¹. Параметры лидара указаны в подписи к рис. 1

Изложенное выше иллюстрируется рис. 2, где приведен расчет характеристик $F'(\rho, B_\lambda)$ при фиксированном $\rho = 10^{-20} \text{ м}^{-3}$, что соответствует рэлеевскому рассеянию с высоты 80 км. Все параметры лидара те же, что и на рис. 1, но импульсная энергия и частота варьируются таким образом, что произведение $Ef = \text{Вт}$ остается неизменным. В соответствии с изменением E меняется и обобщенный параметр K_2 (верхняя шкала). Из приведенных на рисунке данных видно, что только при самом низком уровне фона ($B_\lambda = 10^{-6} \text{ Вт/м}^2 \text{ мкм} \cdot \text{ср}$, что соответствует безлунной ночи) скорость возобновления результатов F почти не зависит от энергии импульса. Так при $E = 10^{-3} \text{ Дж}$ F только на 20% ниже, чем для более высоких значений E . При прочих значениях различия будут очень значительны. Может оказаться, что лидар, обладающий большим энергетическим потенциалом K_1 , будет менее пригоден для измерений, чем лидар с меньшим K_1 , если для последнего дольше выполняется первое из условий (9). Сравнение между собой этих двух условий позволяет определить зону влияния внутренних шумов детектора. Для лидаров с приемными антеннами большого диаметра они могут оказаться несущественными даже при работе в условиях ночного фона неба, если качество применяемой оптики не позволяет осуществить очень высокой пространственной и спектральной селекции фона.

В заключение отметим, что приведенные выше соотношения дают, на наш взгляд, основу для удобных инженерных оценок проектируемых и классификации существующих лидарных систем. Эти оценки не затрагивают искажений сигнала в электронном тракте регистрации, например, в результате просчетов. Не рассматривался также избыточный шум (последствие) детектора, возникающий в результате засветки сигналом от ближних слоев атмосферы. Поскольку эти искажения зависят от уровня сигнала, то есть не являются аддитивными помехами, их описание термином сигнал-шум вызывает затруднения. Поэтому учет указанных искажений и оценка их влияния на точность измерений должны проводиться в особом порядке.

1. Смирнов В. А. Введение в оптическую радиоэлектронику. М.: Сов. радио. 1973. 206 с.
2. Зуев В. Е., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей; Новосибирск: Наука. 1986. 185 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
5 сентября 1988 г.

B. V. Kaul. Generalized Lidar Characteristics.

Convenient analytic expressions for estimating the efficiency of lidar systems as applied to laser remote sensing of the atmosphere are derived. Generalized parameters accounting for the lidar performance are discussed. It is shown that for a particular lidar system, a single-parameter family of characteristics can be constructed that allows lidar capabilities in the presence of the background noise to be adequately described.