«Оптика атмосферы и океана», 5, № 10 (1992)

УДК 551.501.7:535.361

Г.Н. Глазов

УЧЕТ КОНТИНУАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ТРЕХЧАСТОТНОМ МЕТОДЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Игнорирование конечного поглощения между линиями приводит к систематической ошибке лидарного измерения температуры трехчастотным методом дифференциального поглощения. Получены рабочие формулы оценки температуры по принимаемым сигналам, исправляющие этот недостаток, и оценен порядок вносимой поправки.

Введение

Предложенный Мейсоном [1] принцип лидарного зондирования профиля температуры, основанный на температурной зависимости вращательных уровней молекул выбранного газа, был развит до практически приемлемых методов в ряде работ, в частности, в [2]. Имея значительно большую потенциальную эффективность зондирования (комплекс достижимой дальности, точности, пространственного и временного разрешений при заданных энергетических факторах) в сравнении с СКР-методами за счет большего сечения взаимодействия, эти методы предъявляют серьезные требования к спектральным свойствам передатчика и приемника, необходимой априорной информации, обработке сигналов, интерпретации результатов зондирования. В зависимости от принятой стратегии преодоления этих трудностей, обусловленной уровнем технического и информационного обеспечения, используют: двухчастотный метод [3], предъявляющий меньшие требования к излучающей системе, трехчастотный [2], позволяющий уменьшить число априорных предположений и параметров, четырехчастотный, позволяющий подобрать линии с оптимальным соотношением поглощений, и другие модификации.

Пространственно-разрешенный трехчастотный метод, включающий зондирование на длинах волн λ_1, λ_2 центров двух линий поглощения и λ_0 — «провала» между ними, фактически основан на сравнении оценок одной и той же концентрации газа методом дифференциального поглощения на парах длин волн λ_1, λ_0 и λ_2, λ_0. Обычная рабочая формула оценки температуры по принимаемым сигналам в трехчастотном методе [2] выведена в предположении, что поглощение рабочего газа на λ_0 отсутствует. Это создает одну из составляющих методической систематической погрешности, особенно существенную при использовании одной или двух слабых линий. Данная работа устраняет этот недостаток.

Уравнение оценки температуры. Введем обозначения:

P_0, T_0 — давление и температура, при которых измерены параметры используемых линий поглощения используемого газа;

P, T — истинные давление и температура в рассматриваемом слое атмосферы;

σ_{0i} — сечение поглощения одной молекулы газа на λ_i при P_0, T_0 (i = 0, I, 2); σ_i — тоже при Р, T; $\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma_0$ (i = 1, 2);

S_{0i} — сила линии па T_0 (i = 1, 2); S_i — то же, на T;

E''_i — энергия нижнего состояния перехода с λ_i (i = 1, 2); $\Delta E'' = E''_1 - E''_2$;

γ_{0i} – полуширина линии при P_0, T_0 (i = 1, 2); γ_i – то же, при P, T;

$Q(T)$ — частичная функция;

n_i — показатель температурной зависимости полуширины линии; $\Delta n = n_1 - n_2$;

$\tilde{M}_i$, $\tilde{\tau}_i$ — оценки концентрации рабочего газа и двойной оптической толщи дифференциального поглощения в стробе на паре λ_i, λ_0; ~ — знак оценки параметра по лидарным сигналам;

κ_B — постоянная Больцмана;

j — индекс, нумерующий пространственные стробы (j = 1, 2, 3, ...);

α_{ij}, β_{ij} — коэффициенты упругих ослабления и обратного рассеяния в стробе (i = 1, 2);

$n^{\text{с}}_{ij}$, $n^{\text{п}}_{ij}$, n_{ij} — числа одноэлектронных импульсов (ОИ) во временном стробе $\Delta t = 2L/c$: сигнала, фоново-темновой помехи, общее. Записав оценки концентрации рабочего газа в виде

$$\tilde{M}_i = \tilde{\tau}_i / 2L\Delta\sigma_i \, , \; i = 1, 2 \, ,$$

и приравняв их, получаем

$$\ln\Delta\sigma_1 - \ln\Delta\sigma_2 = \ln(\tilde{\tau}_1/\tilde{\tau}_2) \, . \quad (1)$$

Формулы для оценок $\tilde{\tau}_i$ по лидарным сигналам известны, в частности, в счетнофотонном режиме детектирования:

$$\tilde{\tau}_{ij} = \ln \frac{\tilde{n}^{c}_{ij}\, \tilde{n}^{c}_{0,\, j+1}}{\tilde{n}^{c}_{0j}\, \tilde{n}^{c}_{i,\, j+1}} + B - C\ ,\ i = 1,\, 2,\, j = 1,\, 2,\, 3,\, \ldots,$$

$\tilde{n}^{c}_{ij} = n_{ij} - \tilde{n}^{п}_{ij}$, $\tilde{n}^{п}_{ij}$ — оценка числа фоново-темновых ОИ на соответствующем стробе, полученная априорным расчетом или путем счета ОИ в промежутках между эхосигналами,

$$B = \ln(\beta_{i,\, j+1}\beta_{0j} \,/\, \beta_{ij}\beta_{0,\, j+1})\ ,\ C = 2\, L\, (\alpha_{ij} - \alpha_{0j})\ .$$

Левую часть (1) запишем в виде $\ln(\sigma_1/\sigma_2)+A$, где

$$A = \ln\left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_1}\right) - \ln\left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_2}\right) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sigma_0^{\kappa}}{\kappa} \left(\frac{1}{\sigma_2^{\kappa}} - \frac{1}{\sigma_1^{\kappa}}\right). \qquad (2)$$

Как известно [2],

$$\sigma_i = \frac{S_i}{\pi\gamma_i}\ ,\quad \gamma_i = \gamma_{0i}\,\frac{P}{P_0}\left(\frac{T_0}{T}\right)^{n_i},\quad S_i = S_{0i}\,\frac{Q(T_0)}{Q(T)}\,\exp\left[\frac{E'_i}{\kappa_B}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

так что

$$\sigma_i = \sigma_{0i}\,\frac{Q(T_0)P_0}{Q(T)P}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_i}\exp\left[\frac{E''_i}{\kappa_B}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right], \qquad (3)$$

где $\sigma_{0i} = S_{0i}/\pi\gamma_{0i}$. Сделаем приближение в (2), (3), воспользовавшись тем, что

$$|\Delta T| = |T - T_0| \ll T_0.$$

Обозначив

$$\mu = \Delta n + \frac{E''}{\kappa_B\, T_0}\ ,\quad \nu = \mu\, T_0\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right), \qquad (4)$$

найдем

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \simeq \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{02}}(1 + \nu)\ ,\ \frac{1}{\sigma_2^{\kappa}} - \frac{1}{\sigma_1^{\kappa}} = \frac{1}{2}\left[\frac{1}{\sigma_2^{\kappa}}\left(1 - \frac{\sigma_2^{\kappa}}{\sigma_1^{\kappa}}\right) - \frac{1}{\sigma_1^{\kappa}}\left(1 - \frac{\sigma_1^{\kappa}}{\sigma_2^{\kappa}}\right)\right] \simeq \frac{1}{2}\left[\frac{1}{\sigma_{02}^{\kappa}} - \frac{1}{\sigma_{01}^{\kappa}} - \frac{1}{\sigma_{01}^{\kappa}(1 + \nu)^{\kappa}} + \frac{1}{\sigma_{02}^{\kappa}}(1 + \nu)^{\kappa}\right]. \qquad (5)$$

Полагая σ_0=σ_{00} и обозначая $\rho_i = \sigma_{00}/\sigma_{0i}$ (i = 1, 2), η = 1+ν, найдем

$$A = \frac{1}{2}\,[\ln(1 - \rho_1) - \ln(1 - \rho_2) + \ln(1 - \rho_1/\eta) - \ln(1 - \rho_2\eta)].$$

Уравнение оценки (1) принимает вид

$$\ln\eta + \frac{1}{2}\ln\frac{(1 - \rho_1)(1 - \rho_1/\eta)}{(1 - \rho_2)(1 - \rho_2\eta)} = \ln\xi\ ,$$

где

$$\xi = \frac{\tilde{\tau}_1\, \sigma_{02}}{\tilde{\tau}_2\, \sigma_{01}}\ ,$$

или, после потенцирования.

$$(1 - \rho_1)\eta^2 - [(1 - \rho_1)\,\rho_1 - (1 - \rho_2)\,\rho_2\,\xi^2]\,\eta - (1 - \rho_2)\,\xi^2 = 0. \qquad (6)$$

Решение уравнения оценки. Решение (6) $\tilde{\eta}$ дает оценку $\tilde{\nu} = \tilde{\eta} - 1$ и в силу (4) оценку температуры

$$\tilde{T} = T_0 (1 - \tilde{\nu}/\mu)^{-1} \; . \tag{7}$$

В нулевом приближении по σ_{00} (т. е. при ρ_1, $\rho_2 = 0$) из (6) имеем

$$\tilde{\nu}^{(0)} = \xi - 1, \; \tilde{T}^{(0)} = T_0 \left(1 - \frac{\xi - 1}{\mu}\right)^{-1} ,$$

что при $|\nu| \ll 1$, как и следовало ожидать, дает соотношение

$$\tilde{T}^{(0)} = T_0 \left[1 - \frac{\ln(\tilde{\tau}_1 \, \sigma_{02} / \tilde{\tau}_2 \, \sigma_{01})}{\Delta n + \Delta E'' / \kappa_B \, T_0} \right]^{-1} , \;\; \nu \ll 1 \; , \;\; \sigma_{00} = 0 \; , \tag{8}$$

совпадающее с формулой (5) работы [2]. С другой стороны, при $\nu \ll 1$ уравнение (6) дает оценку

$$\tilde{\nu} \simeq \frac{(1 - \rho_2)^2 \xi^2 - (1 - \rho_1)^2}{(1 - \rho_1)(2 - \rho_1) - (1 - \rho_2)\rho_2 \xi^2} , \;\; \nu \ll 1$$

которая при ρ_1, $\rho_2 = 0$ снова дает (8).

В общем случае нужный корень уравнения (6) определяется правильной асимптотикой по ρ_1, ρ_2 и равен

$$\tilde{\eta} = \frac{\rho_1 - \rho_2 \, g}{2} + \sqrt{\frac{(\rho_1 - \rho_2 g)^2}{4} + g} \; , \tag{9}$$

где

$$g = \frac{1 - \rho_2}{1 - \rho_1} \xi^2 \; .$$

Практически ρ_t, ρ_2 достаточно малы и вместо (9) можно использовать оценку в первом приближении по σ_{00}:

$$\tilde{\eta}^{(1)} = \xi^2 + \rho_1 (1 + \xi^2)/2 - \rho_2 \xi^2 \; . \tag{10}$$

Относительная поправка. Чтобы определить насколько существен учет континуального поглощения, рассмотрим относительную поправку оценки температуры

$$\delta_T = \left. \frac{\tilde{T} - \tilde{T}^{(0)}}{\tilde{T}^{(0)}} \right|_{\xi = 1 + \nu} \simeq \left. \frac{\tilde{T} - \tilde{T}^{(0)}}{T_0} \right|_{\xi = 1 + \nu} = \left. \frac{\tilde{\nu} - \tilde{\nu}(0)}{\mu} \right|_{\xi = 1 + \nu} ,$$

учтя, что из (4)

$$\nu \simeq \frac{\Delta T}{T_0} \mu \; .$$

В общем случае, из (9) находим

$$\delta_T = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\rho_1 - \rho_2 \, h}{2} + \sqrt{\frac{(\rho_1 - \rho_2 \, h)^2}{4} + h} \; - 1 - \nu \right] , \tag{11}$$

где

$$h = \frac{1 - \rho_2}{1 - \rho_1} (1 + \nu)^2 \; .$$

Для наглядности запишем (11) в первом порядке по σ_{00}:

$$\delta_T^{(1)} = \frac{\Delta T}{T_0} \left[\varphi + \frac{\rho_1}{2} (1 + \varphi^2) - \rho_2 \, \varphi^2 \right] ,$$

где

$\varphi = 1 + \nu$.

Для определенности примем $\rho_2 \le \rho_1$. Очевидно, что при данном ρ_1 $\delta_T^{(1)}$ линейно зависит от $\theta = \rho_2 / \rho_1$, принимая крайние значения

$$\delta_{T_{\max}}^{(1)\min} = \frac{\Delta T}{T_0} \left[\varphi + \frac{\rho_1}{2} (1 \mp \varphi^2) \right]$$

при $\theta = 1$, $\theta = 0$ соответственно и «среднее» значение

$$\delta_{T_{\text{ср}}}^{(1)} = \frac{\Delta T}{T_0} \left(\varphi + \frac{\rho_1}{2} \right)$$

при $\theta = 1/2$.

Заключение

Полученные простые рабочие формулы (9), (10), учитывающие конечное поглощение между линиями, исправляют обычную оценку температуры трехчастотным методом дифференциального поглощения. Относительная поправка имеет порядок относительного отклонения фактической температуры от опорной. Подобное рассмотрение, выходящее за рамки данной статьи, необходимо и для других методов измерения температуры по дифференциальному поглощению.

1. Mason J. // Appl. Opt. 1975. V. 14. № 1. P. 76–78.
2. Endemann M., Byer R.L. // Appl. Opt. 1981. V. 20. № 18. P. 3211–3217.
3. Korb C.L, Schwemmer G.K., Dombrowski M,, Weng C.Y. // Opt. and Laser Remote Sensing. W. Berlin: Springer, 1983. P. 120–127.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1984. 831 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
27 июля 1992 г.

G.N. Glazov. **An Account for Continuous Absorption of Light in the Three- Frequency Method of Temperature Sensing.**

A neglect of a finite absorption of light at wavelengths between the atmospheric absorption lines results in a systematic error of temperature measurements using a three-frequency DIAL technique. Formulas for estimating temperature from lidar returns that correct the technique for this effect are derived. The magnitude of thus obtained correction is estimated.