

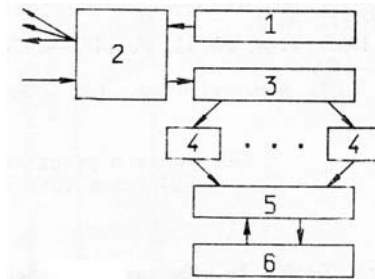
С.Н. Волков

КОМПЛЕКСНЫЙ ЛИДАРНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НИЖНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ

На основе использования эффекта КР в дистанционном зондировании атмосферы предложен комплексный метод для одновременного определения вертикальной стратификации оптико-метеорологических и турбулентных параметров нижних слоев атмосферы. Показана возможность реализации комплексного КР-лидара для одновременного измерения вертикальной стратификации температуры, влажности, аэрозоля и скорости ветра в диапазоне 250–1000 м.

Дистанционное зондирование, использующее эффект спонтанного комбинационного рассеяния лазерного излучения на основных газовых компонентах атмосферы, является объектом внимания исследователей в последние два десятилетия. Не останавливаясь на общей характеристике КР, см., например, [1], необходимо отметить, что ряд работ последних лет, связанных с разработкой СКР-методики измерения вертикального профиля температуры [2], СКР-методики измерения оптических параметров атмосферы [3], измерением вертикальных профилей влажности, попыткой перехода к изучению статистических свойств измеряемых параметров атмосферы [4], а также с возможностью привлечения корреляционной методики измерения ветра в СКР-лидаре, в частности трехлучевой, для измерений, проводимых в одних пространственных и временных интервалах, позволяют определить круг задач, решаемых с помощью комплексного КР-лидара:

- а) исследование вертикальной структуры полей оптических и метеорологических параметров;
- б) исследование динамики процессов в пограничном слое, связанных с передачей механической и тепловой энергии в различных метеоусловиях.



Блок-схема комплексного КР-лидара: 1 – источник излучения; 2 – приемопередающая оптика; 3 – монохроматор; 4 – ФЭУ с дискриминаторами; 5 – многоканальный накопитель; 6 – ЭВМ

На рисунке показана блок-схема комплексного лидара для спонтанного комбинационного рассеяния. Рассматривая комплексный КР-лидар как многоканальный спектральный прибор, работающий в режиме счета фотонов, в котором в качестве каналов выступают выделенные участки спектра, систему лидарных уравнений, описывающую мощность сигналов, принимаемых фотодетекторами в приближении однократного рассеяния, можно выразить уравнениями вида

$$\begin{cases} N(\lambda_0, H) = C_0 \Phi_0(H) \{ \beta_{\pi}^p(H) + \beta_{\pi}^m(H) \} T^2(\lambda_0, H) H^{-2} + N_{\Phi,0}, \\ N^{k,p}(\lambda, H) = C_i \Phi_i(H) \beta_{\pi,i}^{k,p}(H) T(\lambda_0, H) T(\lambda, H) H^{-2} + N_{\Phi,i}, \end{cases} \quad (1)$$

где $N(\lambda_0, H)$ – эхосигнал, соответствующий рэлеевскому и Ми-рассеянию; $N_i^{k,p}(\lambda, H)$ – сигнал соответствующего участка спектра комбинационного рассеяния; λ_0 – длина волны излучения лазера; λ – центральная длина волны соответствующего спектрального участка, выделенного монохроматором; $i = 1, 2, H_2O, O_2, N_2, CO_2$ – индекс, указывающий принадлежность канала соответственно двум температурочувствительным участкам чистовращательного спектра и колебательно-вращательным компонентам молекулярных составляющих атмосферы; C – аппаратная постоянная каналов, включающая площадь приемного телескопа, число излученных фотонов, коэффициенты пропускания передающей и принимающей оптики, квантовую эффективность фотодетектора и интервал усреднения ΔH ; $\Phi(H)$ – геометрический фактор для соответствующего спектрального интервала; H – высота; $\beta_{\pi}^p(H), \beta_{\pi}^m(H), \beta_{\pi,i}^{k,p}(H)$ – объемные коэффициенты рассеяния назад, соответственно аэрозольный, рэлеевский и i -е молекуляр-

ные вращательные и колебательно-вращательные компоненты составляющих атмосферы; $T(\lambda_0, H)$, $T(\lambda, H)$ — объемные коэффициенты пропускания; $N_{\phi,i}$, $N_{\phi,0}$ — сигналы от фона.

Выбор температурочувствительных участков для чисто вращательного спектра комбинационного рассеяния рассмотрен в [5].

Восстановление профилей параметров атмосферы опирается на предположение [6], что оптические параметры фактически не зависят от λ на протяжении интервала $\delta\lambda$ в нижней атмосфере:

$$T(\lambda + \delta\lambda) \simeq T(\lambda);$$

$$\beta_{\pi}(\lambda + \delta\lambda) \simeq \beta_{\pi}(\lambda). \quad (2)$$

Кроме того, считаем, что вклад в объемный коэффициент молекулярного рассеяния в выбранных участках чистовращательного спектра вносят те же компоненты атмосферы и в таких же соотношениях, как в $\beta_{\pi}^p(H)$, т.е.:

$$\beta_{\pi}^p(H) = \gamma(\beta_{\pi,1}^{k,p}(H, T) + \gamma_k \beta_{\pi,2}^{k,p}(H, T)), \quad (3)$$

где γ , γ_k — постоянные; T — температура.

Измерение вертикального профиля скорости ветра связано с предположением о наличии в атмосфере аэрозольных неоднородностей, переносимых ветром [7]. Выделяя в пространстве три рассеивающих объема и полагая неоднородности изотропными по горизонтали и долгоживущими, можно найти сдвиг максимума временной корреляционной функции, обратнопропорциональный скорости ветра, из условия минимума:

$$\frac{\partial \rho(H, l, \tau)}{\partial \tau} = 0, \quad (4)$$

где $\rho(H, l, \tau)$ — коэффициенты корреляции на высоте H в двух точках, разнесенных по горизонтали на расстоянии l при временном сдвиге τ .

Коэффициенты комбинационного рассеяния примерно на четыре порядка меньше коэффициентов аэрозольного рассеяния для МДВ более 10 км. Тогда полагая, что за время накопления эхосигналов в каналах неупругого рассеяния измерение профилей сигналов в аэрозольных каналах происходит за время, меньшее на четыре порядка, система лидарных уравнений (1) для эхосигналов с высоты H в стробе длиной ΔH с учетом (2), (3) и (4) преобразуется следующим образом:

$$\begin{cases} R_{\beta} = \gamma_{\beta} \frac{\bar{N}_1 - N_{\phi}}{N_1^{k,p} - N_{\phi,1} + \gamma_k (N_2^{k,p} - N_{\phi,2})}, \\ R_{TR} = \gamma_{TR} \{N_1^{k,p} - N_{\phi,1} + \gamma_k (N_2^{k,p} - N_{\phi,2})\}, \\ R_i = \gamma_i \frac{N_i^{k,p} - N_{\phi,i}}{N_{N_2}^{k,p} - N_{\phi,N_2}}, \\ R_T = \gamma_T \frac{N_1^{k,p} - N_{\phi,1}}{N_2^{k,p} - N_{\phi,2}}, \end{cases} \quad (5)$$

$R_{\beta} = R_{\beta}(H) = \frac{\beta_{\pi}^p(H) + \beta_{\pi}^m(H)}{\beta_{\pi}^p(H)}$ — профиль отношения рассеяния; $R_i = R_i(H) = \beta_{\pi,i}^{k,p}(H) \beta_{N_2}^{k,p}(H)$ — про-

филь отношения для i -й компоненты атмосферы относительно азота; $R_{TR} = R_{TR}(H)$ — профиль коэффициента пропускания атмосферы на длине волны лазера; $\gamma_{\beta} = \gamma_{\beta}(H)$, $\gamma_{TR} = \gamma_{TR}(H)$, $\gamma_i = \gamma_i(H)$, $\gamma_T = \gamma_T(H)$ — нормировочные профили; $R_T = R_T(H)$ — профиль отношения температуры.

С учетом предположений о времени накопления сигналов упругого рассеяния по отношению к сигналам неупругого рассеяния систему (5) можно дополнить:

$$\begin{cases} \rho_{12}(\tau) = \sum_t \sum_{t' < t} \{\bar{N}_1 - N_1(t)\} \{\bar{N}_2 - N_2(t')\} / \sigma_1 \sigma_2, \\ \rho_{23}(\tau) = \sum_t \sum_{t' < t} \{\bar{N}_2 - N_2(t)\} \{\bar{N}_3 - N_3(t')\} / \sigma_2 \sigma_3, \end{cases} \quad (6)$$

где $\rho_{12}(\tau) = \rho_{12}(H, l, \tau)$, $\rho_{23}(\tau) = \rho_{23}(H, l, \tau)$ – матрицы нормированных коэффициентов корреляции для трех лучей, находящихся в вершинах прямоугольного треугольника с катетами, равными $l = l(H)$; $\tau = t - t'$ – временной сдвиг; $N_1(t)$, $N_2(t)$, $N_3(t)$ – соответственно $N_1(\lambda_0, H, t)$, $N_2(\lambda_0, H, t)$, $N_3(\lambda_0, H, t)$ – зарегистрированные эхосигналы для трех лучей в момент времени t ; \bar{N}_1 , \bar{N}_2 , \bar{N}_3 и σ_1 , σ_2 , σ_3 – средние и среднеквадратические отклонения для сигналов от трех аэрозольных каналов на высоте H . Нормирующие профили определяются с учетом (2) из соотношений вида

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{\beta}(H) = \frac{C_1 \Phi_1(H)}{C_0 \Phi_0(H)}, \\ \gamma_{TR}(H) = \frac{\gamma H^2}{\beta_{\pi}^p(H_0) C_1 \Phi_1(H)}, \\ \gamma_i(H) = \frac{C_{N_i} \Phi_{N_i}(H)}{C_i \Phi_i(H)}, \\ \gamma_T(H) = \frac{C_2 \Phi_2(H)}{C_1 \Phi_1(H)}. \end{array} \right. \quad (7)$$

В предположении, что геометрические факторы одинаковые, нормирующие профили вырождаются в константы, для доопределения которых достаточно использовать сигналы с начального строба. Ситуация заметно усложняется, если начальный строб находится выше 50 м и особенно для $\gamma_{TR}(H)$, в который входит в явном виде геометрический фактор, поскольку начальные параметры в этом случае трудно контролировать. Ситуация разрешается, если есть возможность работы по горизонту в пределах формирования геометрического фактора. Исходя из свойства горизонтальной изотропности атмосферы, можно определить как начальные параметры, так и вид геометрического фактора.

При реализации комплексного трехлучевого КР-лидара, работающего в режиме счета фотонов, ставится цель согласовать время накопления достаточной статистики при измерении сигналов упругого рассеяния с временем накопления слабых сигналов неупругого рассеяния. Необходимое разнесение лучей и время накопления можно оценить следующим образом. На высоте H за время измерения t относительную погрешность измерения скорости V ветра можно представить в виде

$$\epsilon_V \simeq \frac{\Delta l}{l} = \frac{tv}{l}.$$

Время измерения можно оценить, исходя из пуассоновской статистики счета фотонов, и если D – динамический диапазон огибающей эхо-сигнала, f – частота лазерных посылок, то с учетом принудительного ослабления эхосигналов аэрозольного канала до уровня, при котором вероятность приема фотоэлектрона с ближней зоны приближается к единице при каждом выстреле:

$$v + \epsilon v^{1/2} \leq 1,$$

где v – параметр распределения Пуассона; ϵ – оценка относительной погрешности накопления фотоэлектронов за время t , получим

$$\epsilon \simeq \sqrt{D/\epsilon v t}.$$

Тогда

$$l = vD/\epsilon v \epsilon^2 f.$$

Если определить в качестве критерия совпадение уровня флуктуаций аэрозоля, равного 0,05, с уровнем флуктуаций в результате накопления в условиях пуассоновской статистики, то оценка для $v = 5 - 10$ м/с, $D = 10$, $f = 10$ кГц, $\epsilon = 0,05$ и $\epsilon_V = 0,1$ дает минимальное разнесение порядка 20 – 40 м без учета вклада шумов источника и приемников излучения. Принимая оптимальным разнесение в интервале 40 – 150 м, получим информативный интервал измерений от 250 до 1000 м. Доля мощности, отводимая от основного излучения на создание дополнительных лучей, определяется как

$$\frac{\delta U}{U} = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3,$$

где γ_1 — отношение пропусканий приемного аэрозольного канала к каналу КР; γ_2 — отношение сечений рассеяния КР к аэрозолю; $\tilde{\gamma}_3$ — отношение времен накоплений одного профиля в канале аэрозоля к каналу КР. Для $\gamma_1 = 0,2$, $\gamma_2 = 0,0001$, $\tilde{\gamma}_3 = 250$ оценка верхнего предела доли средней отводимой мощности равна 0,005 или 25–50 мВт от 5–10 Вт мощности источника, применяемого при зондировании КР.

Обсуждение экспериментальных результатов выходит за пределы данной статьи. К настоящему времени элементы комплексной методики с нормировкой параметров по горизонту осуществлены при измерении вертикальных профилей температуры, отношения смеси для паров воды и оптических параметров атмосферы [8]. Измерение профиля баланса атмосферы, профилей скорости ветра и турбулентных параметров является перспективой развития комплексного КР-лидара.

Одновременное измерение с разрешением 12–15 м до высоты около 1000 м вертикальных реализаций скалярных полей температуры, влажности, аэрозоля и векторного поля скоростей ветра в одних пространственно-временных интервалах дает возможность исследовать взаимосвязь и статистику случайных полей от микро- до мезомасштаба.

В заключение автор выражает глубокую признательность Ю.Ф. Аршинову, С.М. Бобровникову и Б.В. Каулю за помощь в подготовке и обсуждении материала статьи.

1. Глазов Г. Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 312 с.
2. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E., Mitev V. //Appl. Opt. 1983. V. 22. № 19. p. 2984.
3. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E., Nadeev A.I., Shelevoy K.D. //13th International Laser Radar Conference, 1986. V. 13. Aug. 11–15. P. 189.
4. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Volkov S.N., Zuev V.E., Shumskii V.K. //Laser and Optical Remote Sensing, Technical Digest Series. 1987. V. 18. Sep. 28–Oct. 1. P. 44.
5. Cohen A., Cooney J.A. and Geller K.N. //Appl. Opt. 1976. V. 15. № 11. P. 2896.
6. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М. //VII Всес. совещание по лазерному и акустическому зондированию атмосферы, Томск, 1982. С. 7.
7. Матвиенко Г.Г. //Оптика атмосферы, 1988. Т. 1. № 6. С. 3.
8. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Volkov S.N., Zuev V.E., Shumskii V.K. //14th International Laser Radar Conference. 1988. June 20–24. Sec. 2.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
3 июля 1989 г.

S. N. Volkov. The Complex Lidar Method for Investigation of Lower Atmospheric Layers.

A complex method for simultaneous investigations of vertical stratification of the optical-meteorological and turbulent parameters of lower atmospheric layers is suggested in the paper. This method is based on the use of the compound scattering (CS) effect in remote sensing of the atmosphere. A possibility to produce a complex CS-lidar for simultaneous measuring the vertical stratification of temperature, humidity, aerosol and wind velocity in the range 250 to 1000 m is also described here.