

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 551.501.8

А.А. Афанасьев, Г.Я. Патрушев

**ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ СКОРОСТИ ВЕТРА НА
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННУЮ СТРУКТУРУ
СИГНАЛОВ АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА**

Проводится аналитическое исследование влияния флуктуаций скорости ветра на взаимные характеристики флуктуаций сигналов аэрозольного лидара. Рассмотрено влияние величины пространственной анизотропии флуктуаций скорости во временной и спектральной областях. Показано, что при <сильных> флуктуациях скорости ветра фазовый спектр становится нелинейным.

Пространственно-временная структура лидарных сигналов используется для изучения динамики атмосферных процессов и дистанционного зондирования поля скорости ветра. До недавнего времени лазерно-локационные измерения скорости ветра основывались главным образом на корреляционной методике [1], в основе которой лежат общие соображения о связи пространственно-временной структуры сигналов и поля скорости ветра. Более реалистичная модель пространственно-временных флуктуаций скорости ветра использована в [2]. В этой работе сделан вывод о предпочтительности спектральной обработки сигналов для определения средней скорости ветра и, в частности, отмечается устойчивость фазового спектра сигналов к малым флуктуациям ветра. Однако в [2] рассматривалась изотропная модель пространственно-временной структуры поля скорости ветра. Согласно современным теоретическим и экспериментальным данным [3], пространственный спектр флуктуаций скорости ветра в пограничном слое атмосферы является анизотропным (тензором), параметры которого зависят от стратификации в атмосфере и являются предметом исследования.

Считаем, что вариации мощности эхосигнала определяются флуктуациями концентрации частиц в рассеивающем объеме, а для поля концентрации выполняется гипотеза локальной заморозенности [4]. В этом предположении в [2] получено выражение для пространственно-временной корреляционной функции в виде

$$B(\mathbf{r}, \tau) = A \int d^3 r_1 d^3 r_2 d^3 \kappa f(\mathbf{r}_1) f(\mathbf{r}_2 + \mathbf{r}) \Phi_N(\kappa) \exp [i\kappa(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 - \mathbf{v}\tau)], \tag{1}$$

где $A = a^2(TL^{-1})^4 \bar{\sigma}^2$; a – постоянная, определяемая параметрами приемо-передающей системы лидара; T – прозрачность зондируемого слоя; L – длина трассы; $\bar{\sigma}$ – усредненное по распределению частиц по размерам сечение обратного рассеяния; $f(\mathbf{r}) = (2\pi a_u^2)^{-3/2} \exp(-r^2/1 a_u^2)$ – фильтрующая функция, которая определяет размеры изотропно рассеивающего объема a_u ; \mathbf{r} – разнос между центрами объемов; $\Phi_N(\kappa) = 0,033 C_N^2 \kappa^{-11/3} [1 - \exp(-\kappa^2 \kappa_0^{-2})]$ – пространственный спектр флуктуаций концентрации; $\kappa_0 = 2\pi / L_0$; L_0 – внешний масштаб турбулентности; \mathbf{v}_0 – скорость ветра; τ – временная задержка.

Далее, предположим, что декартовы компоненты скорости ветра v_x, v_y, v_z распределены по нормальному закону со средними значениями v_{0x}, v_{0y}, v_{0z} и дисперсиями $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$. Выполнив в (1) интегрирование по пространственным переменным \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 и усреднив по флуктуациям скорости ветра, получим

$$B(\mathbf{r}, \tau) = A \int d^3 \kappa \Phi_N(\kappa) \exp [- (a_u^2 + \frac{1}{2} \sigma_u^2 \tau^2) \kappa^2 + i(\mathbf{r} - \mathbf{v}_0 \tau) \kappa], \tag{2}$$

$$\text{где } v_0^2 = v_{0x}^2 + v_{0y}^2 + v_{0z}^2; \quad \sigma_u^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2.$$

В большинстве метеорологических ситуаций наблюдается существенное различие между дисперсиями флуктуаций компонент горизонтальной и вертикальной скоростей ветра. С целью оценки влияния данного фактора на взаимную корреляционную функцию рассмотрим случай, когда вертикальные флуктуации скорости ветра отличны от флуктуаций в горизонтальной плоскости, т.е. $\sigma_x = \sigma_y = \sigma \neq \sigma_z$. В большинстве случаев скорости горизонтального движения, представляющие наибольший интерес для приложений, гораздо больше скорости вертикальных потоков, поэтому с целью упрощения расчетов предположим, что вертикальная составляющая средней скорости ветра v_{0z} мала по сравнению с горизонтальной и ею можно пренебречь.

Переходя в (2) к сферической системе координат и интегрируя по всем переменным, получим выражение для нормированной, пространственно-временной корреляционной функции обратнорассеянного излучения в виде

$$\frac{B(\mathbf{r}, \tau)}{B(0,0)} = B^{-1} \left\{ \frac{(a_0^2 + \kappa_0^{-2} + \frac{1}{2} \sigma^2 \tau^2)^{5/6}}{(a_0^2 + \kappa_0^{-2} + \frac{1}{2} \sigma_z^2 \tau^2)^{1/2}} \theta_1 \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{3}, \frac{11}{6}, \frac{3}{2}, \frac{-\frac{1}{2}(\sigma^2 - \sigma_z^2)\tau^2}{a_0^2 + \kappa_0^{-2} + \frac{1}{2} \sigma_z^2 \tau^2}; \frac{-(\mathbf{r} - \mathbf{v}_0 \tau)^2}{4(a_0^2 + \kappa_0^{-2} + \frac{1}{2} \sigma^2 \tau^2)} \right) - \frac{(a_0^2 + \frac{1}{2} \sigma^2 \tau^2)^{5/6}}{(a_0^2 + \frac{1}{2} \sigma_z^2 \tau^2)^{1/2}} \theta_1 \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{3}, \frac{11}{6}, \frac{3}{2}, \frac{-\frac{1}{2}(\sigma^2 - \sigma_z^2)\tau^2}{a_0^2 + \frac{1}{2} \sigma^2 \tau^2}; \frac{-(\mathbf{r} - \mathbf{v}_0 \tau)^2}{4(a_0^2 + \frac{1}{2} \sigma^2 \tau^2)} \right) \right\}, \quad (3)$$

где $B = (a_0^2 + \kappa_0^{-2})^{1/3} - a_0^{2/3}$, $\Theta_1(a, a', b; c; t, x)$ – гипергеометрическая функция двух переменных [5]. Отметим, что если в (3) дисперсии компонент скорости ветра положить одинаковыми, т.е. $\sigma_z = \sigma$, тогда $t = 0$, $\Theta_1(a, a', b; c; 0, x) = {}_1F_1(a'; c; x)$; при этом формула (3) упрощается и принимает вид

$$\frac{B(\mathbf{r}, \tau)}{B(0,0)} = B^{-1} \left\{ (a_0^2 + \kappa_0^{-2} + \frac{1}{2} \sigma^2 \tau^2)^{1/3} {}_1F_1 \left(-\frac{1}{3}; \frac{3}{2}; \frac{-(\mathbf{r} - \mathbf{v}_0 \tau)^2}{4(a_0^2 + \kappa_0^{-2} + \frac{1}{2} \sigma^2 \tau^2)} \right) - (a_0^2 + \frac{1}{2} \sigma^2 \tau^2)^{1/3} {}_1F_1 \left(-\frac{1}{3}; \frac{3}{2}; \frac{-(\mathbf{r} - \mathbf{v}_0 \tau)^2}{4(a_0^2 + \frac{1}{2} \sigma^2 \tau^2)} \right) \right\}, \quad (4)$$

где ${}_1F_1(a; c; x)$ – вырожденная гипергеометрическая функция [5]. Формула (4) совпадает с выражением для случая пространственно-изотропных флуктуаций скорости ветра.

Поведение $B(\mathbf{r}, \tau) / B(0,0)$, рассчитанное по формуле (3) для двух крайних случаев $\sigma_z = 0$ и $\sigma_z = \sigma = 1$ м/с для значений $a_Y = 1$ м, $L_0 = 80$ м, $r = 5$ м, $v_0 = 1$ м/с, представлено на рис. 1. Видно, что анизотропия флуктуаций скорости ветра (кривая 1) влияет на взаимную корреляционную функцию следующим образом: уменьшение дисперсии вертикальной компоненты скорости ветра σ_z^2 по сравнению с горизонтальной σ^2 , приводит к смещению максимума корреляции в область больших τ , вызывает уширение корреляционной функции и повышение максимального уровня корреляции по сравнению со случаем изотропных флуктуаций (кривая 2).

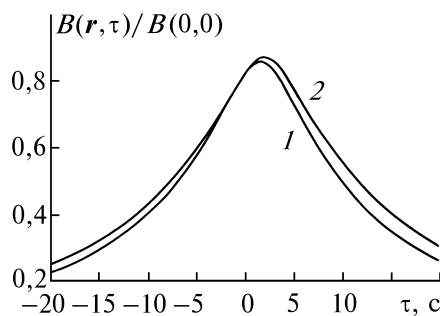


Рис. 1. Влияние анизотропии флуктуаций скорости ветра на взаимную корреляционную функцию лидарных сигналов: 1 – $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma$; 2 – $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, $\sigma_z = 0$

Другой способ обработки лидарных сигналов для измерения скорости ветра основан на использовании методов когерентного анализа. В [2] учет влияния флуктуаций ветра на спектральные характеристики лидарных сигналов проводился для асимптотического случая $\sigma^2/v_0^2 \ll 1$. Однако в ряде практических ситуаций отношение σ^2/v_0^2 может быть порядка или больше 1. Учет флуктуаций ветра при произвольном σ/v_0 для взаимного спектра $W(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B(\mathbf{r}, \tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau$ приводит к выражению

$$W(\mathbf{r}, \omega) = A \cdot 0,033 \pi C_N^{-2} \frac{1}{v_0} \exp(-i\omega r/v_0) \int_0^{\infty} \kappa d\kappa \Phi_N(\kappa) \exp\left[-\left(a_0^2 + \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 r^2}{v_0^2}\right) \kappa^2\right] \times \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{v_0}{\sqrt{2}\sigma} - \frac{\omega}{\sqrt{2}\kappa} + i \frac{\sigma \kappa r}{\sqrt{2}v_0}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{v_0}{\sqrt{2}\sigma} + \frac{\omega}{\sqrt{2}\kappa} - i \frac{\sigma \kappa r}{\sqrt{2}v_0}\right) \right\}, \quad (5)$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота, Гц. (Здесь для простоты разнос рассеивающих объемов \mathbf{r} ориентирован вдоль направления средней скорости v_0 и $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma$).

Поведение спектра когерентности

$$\gamma(\mathbf{r}, \omega) = |W(\mathbf{r}, \omega)| / |W(0, \omega)|$$

и фазового спектра

$$\varphi(\mathbf{r}, \omega) = \arctg \frac{\operatorname{Im} W(\mathbf{r}, \omega)}{\operatorname{Re} W(\mathbf{r}, \omega)}$$

представлено на рис. 2. Приведенные здесь теоретические кривые получены путем численного интегрирования выражения (3) для значений $a_0 = 0,2$ м, $L_0 = 80$ м, $r = 5$ м. Кривые 1 ÷ 3 описывают убывание $\gamma^2(\mathbf{r}, \omega)$ за счет флуктуаций скорости ветра. В области низких частот спектр когерентности насыщается на уровень, зависящий от величины отношения $3\sigma^2/v_0^2$, а в области высоких частот быстро стремится к нулю. Отметим, что при отсутствии флуктуаций ветра спектр когерентности не зависит от частоты и равен 1, а фазовый спектр изменяется линейно – кривые 4' и 5'. Наличие флуктуаций ветра приводит к увеличению наклона фазового спектра пропорционально значению величины $1 + 3\sigma^2/v_0^2$ – кривые 1' ÷ 3'. Причем для больших отношений $\sqrt{3}\sigma/v_0$ (кривая 2), наблюдается ярко выраженное нелинейное поведение $\varphi(\mathbf{r}, \omega)$.

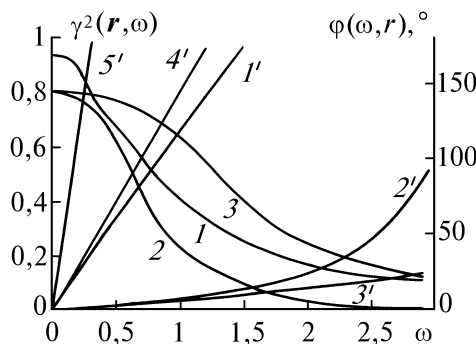


Рис. 2. Поведение спектров когерентности и фазы при наличии сильных флуктуаций скорости ветра: 1 ÷ 3 – спектры когерентности; 1' ÷ 5' – фазовые спектры. а) $v_0 = 2$ м/с; 4' – $\sqrt{3}\sigma/v_0 = 0$; 1, 1' – $\sqrt{3}\sigma/v_0 = 0,5$; 3, 3' – $\sqrt{3}\sigma/v_0 = 5$; б) $v_0 = 0,5$ м/с; 5' – $\sqrt{3}\sigma/v_0 = 0$; 2, 2' – $\sqrt{3}\sigma/v_0 = 10$

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что наличие пространственной анизотропии флуктуаций скорости ветра заметно сказывается на форме функций корреляции лидарных сигналов. Кроме того, наряду с уменьшением когерентности

флуктуации скорости ветра приводят к существенному изменению наклона фазового спектра. Поэтому в целях повышения точности измерения характеристик скорости ветра необходимо учитывать вышеуказанные факторы при интерпретации данных лидарного зондирования.

1. Матвиенко Г.Г., Задде Г.О., Фердинандов Э.С. и др. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука, 1985. 221 с.
2. Балин Ю.С., Беленький М.С., Разенков И.А., Сафонова Н.В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 8. С. 77–83.
3. Kristensen L., Lenschow D.H. // Boundary-Layer Meteorology. 1989. V. 47. P. 149–193.
4. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.:Наука, 1967. 548 с.
5. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Дополнительные главы. М.:Наука, 1986. 800 с.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
30 марта 1994 г.

A.A. Afanas'ev, G.Ya. Patrushev. Effect of Wind Velocity Fluctuations on the Spatiotemporal Structure of Lidar Returns from Aerosol.

An analytical study has been carried out of the influence of wind velocity fluctuations on the mutual characteristics of fluctuations of aerosol lidar returns. The influence of the anisotropy of the wind velocity fluctuations is analyzed in the time and spectral regions. It is shown that under strong fluctuations of wind the phase spectrum becomes nonlinear.