

Измерения скорости и направления ветра когерентным доплеровским лидаром в условиях слабого эхосигнала

В.А. Банах¹, А. Брюер², Е.Л. Пичугина², И.Н. Смалихо^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

²Лаборатория исследования земных систем NOAA

Отделение дистанционного зондирования атмосферы

80305, г. Боулдер, Колорадо, ул. Бродвэй, 325, США

Поступила в редакцию 14.01.2010 г.

Исследуются возможности измерения скорости и направления ветра 2-микронным импульсным когерентным доплеровским лидаром в условиях слабого эхосигнала. Показано, что применение фильтрованной синусоидальной подгонки измеряемых лидаром радиальных скоростей ветра позволяет получать оценки компонент вектора скорости ветра с приемлемой точностью при низких отношениях сигнал-шум вплоть до значений около -20 дБ.

Ключевые слова: когерентный доплеровский лидар, отношение сигнал-шум, ветер; coherent Doppler lidar, signal-to-noise ratio, wind.

Введение

Когерентные доплеровские лидары (КДЛ) находят широкое применение для изучения динамических процессов в атмосфере. Для измерения скорости и направления ветра такими лидарами обычно применяют коническое сканирование зондирующим пучком вокруг вертикальной оси. При использовании сканирующего импульсного КДЛ получают оценки радиальной скорости ветра \hat{V}_r из эхосигналов, измеряемых при различных азимутальных углах сканирования θ и расстояниях от лидара до зондируемого объема R . Затем в предположении горизонтальной однородности поля среднего ветра для каждого фиксированного расстояния R , соответствующего высоте h , из полученных зависимостей $\hat{V}_r(\theta)$ с использованием процедуры синусоидальной подгонки [1–5] определяют вектор скорости ветра $\mathbf{V}(h)$.

Важным параметром, определяющим возможности измерения скорости ветра когерентным доплеровским лидаром, является отношение сигнал-шум (SNR). Для импульсного лидара SNR пропорционально энергии импульса и коэффициенту аэрозольного обратного рассеяния. На больших высотах (выше пограничного слоя атмосферы) концентрация аэрозоля мала и SNR может быть очень низким (недостаточным для проведения измерений ветра). На горизонтальных или слабонаклонных трассах

распространения зондирующего импульса с ростом R , когда размер когерентной площадки приемника становится неизменным, SNR уменьшается пропорционально R^{-2} . Турбулентные флуктуации показателя преломления воздуха также могут существенно влиять на величину SNR [6, 7].

В [5] проведено теоретическое исследование возможностей различных методов оценивания вектора скорости ветра из исходных данных, измеряемых сканирующим КДЛ в условиях слабого эхосигнала. Показано, что применение метода фильтрованной синусоидальной подгонки (ФСП) к зависимости $\hat{V}_r(\theta)$ позволяет получать оценки скорости и направления ветра с приемлемой точностью при таких низких SNR, когда обычная (или прямая) синусоидальная подгонка дает сильно смещенную оценку скорости ветра.

В настоящей работе для восстановления высотных профилей скорости и направления ветра из данных, измеренных импульсным 2-микронным КДЛ наземного базирования, используется ФСП. Путем численного моделирования определена нижняя граница значений SNR, при которых ФСП дает правильный результат, для условий этого натурального эксперимента. Проводится сравнение результатов одновременных измерений скорости и направления ветра акустическими анемометрами и лидаром при слабом эхосигнале.

1. Теория

Пусть во время работы 2-микронного КДЛ в атмосферу посылаются зондирующие импульсы длительностью $\tau_p = 200$ нс (определяемой по спаданию

* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Алан Брюер (Alan.Brewer@noaa.gov); Елена Леонидовна Пичугина (Yelena.Pichugina@noaa.gov); Игорь Николаевич Смалихо (Smalikho@iao.ru).

мощности до уровня $1/2$ справа и слева от точки максимума) и частотой повторения импульсов $f_p = 200$ Гц. При этом применяется коническое сканирование зондирующим пучком вокруг вертикальной оси с угловой скоростью $\omega = 6^\circ/\text{с}$. Таким образом, за одно полное сканирование (θ – от 0° до 360°), осуществляемое за время $T = 360^\circ/\omega = 1$ мин, в атмосферу посылается $N_p = f_p T = 12\,000$ импульсов. Рассеянное в атмосфере излучение собирается телескопом и после смешивания с опорным пучком подается на чувствительную площадку фотодетектора. Из регистрируемых отсчетов эхосигнала получают массив комплексного сигнала $J(mT_s, \theta)$ в полосе пропускания приемника $B = 1/T_s = 50$ МГц, выбранной симметрично вокруг промежуточной частоты f_{LO} (разности частот зондирующего и опорного пучков), где индексы $m = 0, 1, 2, \dots$ соответствуют расстоянию $R_m = R_0 + m\delta R$ от лидара до точки положения зондирующего импульса, $\delta R = cT_s/2 = 3$ м, c – скорость света; $\theta = i\delta\theta$ – азимутальный угол сканирования, $i = 0, 1, 2, \dots, N_p - 1$ и $\delta\theta = 360^\circ/N_p = 0,03^\circ$.

Измеряемые сигналы содержат информацию о скоростях рассеивающих аэрозольных частиц, переносимых ветровым потоком. Чтобы учесть промежуточную частоту f_{LO} , при извлечении такой информации перейдем к новому массиву данных

$$\tilde{J}(mT_s, \theta) = J(mT_s, \theta) \exp(-2\pi j m f_{LO} T_s),$$

где $j = \sqrt{-1}$. Тогда с учетом соотношения Доплера

$$V = (\lambda/2)f$$

(здесь $\lambda = 2$ мкм – длина волны зондирующего излучения и f – частота в спектре эхосигнала) диапазон измеряемых скоростей $V \in [-B_V/2, B_V/2]$. Так как B равно 50 МГц, значение $B_V = (\lambda/2)B = 50$ м/с.

Для получения оценки скорости ветра на высоте $h = h_L + R \sin\phi$, где h_L – высота источника зондирующего излучения и ϕ – угол наклона зондирующего пучка к поверхности земли (угол места), с заданным разрешением по высоте необходимо из исходных данных для каждой посылки импульса выбрать по M отсчетов сигнала, соответствующих этому разрешению, вокруг точки $R = R_0 + m_R \delta R$ (индекс $m_R = (R - R_0)/\delta R$). Измеряемый сигнал J представляет собой сумму полезной составляющей J_S , несущей информацию о скорости ветра, и шумовой составляющей J_N сигнала. Перейдем к нормированному сигналу:

$$Z(m', i) = \frac{\tilde{J}((m_R - M/2 + m')T_s, i\delta\theta)}{\sqrt{\langle |J_N|^2 \rangle}}, \quad (1)$$

где $m' = 0, 1, 2, \dots, M - 1$; $\langle |J_N|^2 \rangle$ – средняя мощность шума, которую можно определить на больших расстояниях R , когда $J \approx J_N$.

Оценка автоковариационной функции нормированного сигнала может быть получена как

$$\hat{C}_Z(l, R, \theta_n) = \frac{1}{N_a} \sum_{i'=0}^{N_a-1} \frac{1}{M-l} \sum_{m'=0}^{M-l-1} Z(m'+l, i') Z^*(m', i'), \quad (2)$$

где $l = 0, 1, 2, \dots, M - 1$; $\theta_n = (n - 1/2)\Delta\theta$; $n = 1, 2, 3, \dots, N_p/N_a$; $\Delta\theta = N_a\delta\theta$ – разрешение по азимутальному углу; N_a – число зондирующих импульсов, используемых для усреднения (аккумуляции); $i'' = (n - 1/2)N_a + i'$. В силу нормировки средняя величина

$$\langle \hat{C}_Z(0, R, \theta_n) \rangle = \text{SNR} + 1.$$

Здесь $\text{SNR} = \langle |J_S|^2 \rangle / \langle |J_N|^2 \rangle$ – отношение сигнал-шум. Оценка отношения сигнал-шум определяется по формуле

$$\hat{\text{SNR}}(R) = \frac{1}{N_E} \sum_{n=1}^{N_E} \hat{C}_Z(0, R, \theta_n) - 1, \quad (3)$$

где $N_E = N_p/N_a$.

Информацию о радиальной скорости ветра можно извлечь из измеренной автоковариационной функции $\hat{C}_Z(l, R, \theta_n)$ по ее аргументу или по максимуму правдоподобия [8, 9]. В натурном эксперименте, результаты которого представлены ниже, оценки радиальной скорости ветра $\hat{V}_r(\theta_n)$ были получены из доплеровских спектров, определяемых как

$$\hat{S}(V_k, R, \theta_n) = \frac{1}{N_a} \sum_{i'=0}^{N_a-1} \frac{1}{M} \left| \sum_{m'=0}^{M-1} Z(m', i') \exp\left(-2\pi j \frac{m'k}{M'}\right) \right|^2. \quad (4)$$

В соответствии с (4) и (2) выражение для доплеровского спектра представим в другом виде:

$$\begin{aligned} \hat{S}(V_k, R, \theta_n) &= \\ &= \text{Re} \left\{ \sum_{l=0}^{M-1} (2 - \delta_l) \left(1 - \frac{l}{M}\right) \hat{C}_Z(l, \theta_n) \exp\left(-2\pi j \frac{lk}{M'}\right) \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

где $V_k = (k - M'/2)\delta V$; $\delta V = (\lambda/2)/(M'T_s)$ – шаг по скорости; δ_l – символ Кронекера ($\delta_0 = 1$ и $\delta_{l \neq 0} = 0$) и $k = 0, 1, 2, \dots, M' - 1$. При регистрации $M = 10$ отсчетов эхосигнала зондирующий импульс проходит расстояние $\Delta R = M\delta R = 30$ м, которое совпадает с продольным размером «мгновенного» зондируемого объема $c\tau_p/2$. При этом в измеряемом спектре разрешение по скорости $\Delta V = (\lambda/2)/(M'T_s)$ составляет 5 м/с. Чтобы получить шаг по скорости $\delta V = 0,1$ м/с, в (5) необходимо положить $M' = 500$. Ниже при численном моделировании оценки радиальной скорости $\hat{V}_r(R, \theta_n)$ были получены по положению спектрального пика, т.е.

$$\hat{V}_r(R, \theta_n) = \left(k_{\max} - \frac{M'}{2}\right) \delta V. \quad (6)$$

Здесь k_{\max} – индекс, соответствующий точке максимума спектра $\hat{S}(V_k, \theta_n)$.

Так как число N_a ограничено, спектр $\hat{S}(V_k, R, \theta_n)$ представляет собой частично усредненную случайную

величину и имеет случайные пики, связанные с флуктуациями шумовой и полезной составляющей спектра. При очень низком отношении сигнал-шум, когда полезная составляющая спектра буквально «тонет» в шуме, индекс k_{\max} с большой вероятностью будет связан с шумовым пиком. В случае, когда усредненная шумовая составляющая спектра представляет собой «белый» шум, для плотности вероятности $p(\hat{V}_{rn} | \mathbf{V})$ можно воспользоваться моделью [9, 10]:

$$p(\hat{V}_{rn} | \mathbf{V}) = \frac{1-b}{\sqrt{2\pi}g} \exp\left[-\frac{(\hat{V}_{rn} - \mathbf{S}_n \cdot \mathbf{V})^2}{2g^2}\right] + \frac{b}{B_V}, \quad (7)$$

где $\hat{V}_{rn} \equiv \hat{V}_r(R, \theta_n)$; g^2 – дисперсия «хороших» оценок; b – фракция «плохих» оценок радиальной скорости ветра ($0 \leq b \leq 1$). В (7) $\mathbf{V} = \{V_z, V_x, V_y\}$ – вектор скорости ветра и $\mathbf{S}_n = \{\sin\phi, \cos\phi \cos\theta_n, \cos\phi \sin\theta_n\}$. Если оценки радиальной скорости ветра являются независимыми, то их совместная плотность вероятности представима в виде

$$p(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rN_E} | \mathbf{V}) = \prod_{n=1}^{N_E} p(\hat{V}_{rn} | \mathbf{V}). \quad (8)$$

Воспользовавшись (7) и (8), можно получить оценку вектора скорости ветра $\hat{\mathbf{V}}$ по максимуму правдоподобия [11]:

$$\max\{p(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rN_E} | \mathbf{V})\} = p(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rN_E} | \hat{\mathbf{V}}). \quad (9)$$

Рассмотрим частные случаи, позволяющие упростить рассматриваемую задачу. При условии $b \ll 1$ (когда SNR является достаточно высоким и вероятность «плохой» оценки \hat{V}_r пренебрежимо мала) из (7) и (8) получаем приближенную формулу

$$p(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rN_E} | \mathbf{V}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}g)^{N_E}} \exp\left[-\frac{1}{2g^2} \sum_{n=1}^{N_E} (\hat{V}_{rn} - \mathbf{S}_n \cdot \mathbf{V})^2\right]. \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует, что оценку вектора скорости ветра можно получить путем решения системы линейных уравнений

$$\nabla \sum_{n=1}^{N_E} (\hat{V}_{rn} - \mathbf{S}_n \cdot \mathbf{V})^2 |_{\mathbf{V}=\hat{\mathbf{V}}} = 0, \quad (11)$$

где $\nabla = \{\partial/\partial V_z, \partial/\partial V_x, \partial/\partial V_y\}$. Такой алгоритм в дальнейшем будем называть прямой синусоидальной подгонкой (ПСП). В работе [5] показано, что при использовании ПСП среднее значение оценки вектора скорости ветра определяется выражением

$$\langle \hat{\mathbf{V}} \rangle = (1-b)\mathbf{V}_t,$$

где \mathbf{V}_t – истинный вектор скорости ветра. В общем случае такая оценка является смещенной ($\langle \hat{\mathbf{V}} \rangle \neq \mathbf{V}_t$). При очень низких SNR, когда $b \rightarrow 1$, средние значения оценок компонент вектора скорости ветра $\langle \hat{V}_z \rangle \rightarrow 0$, $\langle \hat{V}_x \rangle \rightarrow 0$ и $\langle \hat{V}_y \rangle \rightarrow 0$.

В другом предельном случае, когда SNR очень мало и выполняется условие $1-b \ll \sqrt{2\pi}g/B_V$, из (7) и (8) получаем следующую приближенную формулу:

$$p(\hat{V}_{r1}, \hat{V}_{r2}, \dots, \hat{V}_{rN_E} | \mathbf{V}) = \left(\frac{b}{B_V}\right)^n + \left(\frac{b}{B_V}\right)^{n-1} \frac{1-b}{\sqrt{2\pi}g} \sum_{n=1}^{N_E} \exp\left[-\frac{(\hat{V}_{rn} - \mathbf{S}_n \cdot \mathbf{V})^2}{2g^2}\right]. \quad (12)$$

В соответствии с (9) и (12) вектор скорости ветра определяется путем нахождения точки максимума функции

$$Q(\mathbf{V}) = \sum_{n=1}^{N_E} \exp\left[-\frac{(\hat{V}_{rn} - \mathbf{S}_n \cdot \mathbf{V})^2}{2g^2}\right], \quad (13)$$

т.е. для оценки $\hat{\mathbf{V}}$ можно записать

$$\max\{Q(\mathbf{V})\} = Q(\hat{\mathbf{V}}). \quad (14)$$

В отличие от ПСП этот подход [формулы (13) и (14)] позволяет осуществлять фильтрацию «хороших» оценок радиальной скорости ветра и, следуя [5], его будем называть фильтрованной синусоидальной подгонкой. При низких SNR значение g , примерно равное ширине доплеровского спектра σ_S (в единицах скорости) [9], определяется τ_p , M и дисперсией турбулентных вариаций скорости ветра σ_V^2 . Для рассматриваемых здесь параметров лидара и обработки исходных данных ($\lambda = 2$ мкм, $\tau_p = 200$ нс, $M = 10$), а также типичных σ_V^2 значение g , равное 2 м/с, является наиболее оптимальным. При этом, как показано в [5], метод ФСП применим при малых и больших SNR.

Определим наименьшее SNR, при котором ФСП дает результат с приемлемой точностью, когда погрешности оценок скорости и направления ветра не превышают соответственно 1 м/с и 5°. Для этого воспользуемся численным моделированием сигнала $Z(m', i)$ [12–14]. В соответствии с натурным экспериментом положим N_a равным 50. Это означает, что разрешение по азимутальному углу $\Delta\theta$ равно 1,5° и число оценок радиальных скоростей ветра, получаемых при фиксированном R за одно полное сканирование, N_E равно 240. В натурном эксперименте угол места ϕ был небольшим (от 0 до 30°), поэтому при обработке данных численного и натурального эксперимента, полагая V_z равным 0, определялись лишь горизонтальные компоненты скорости ветра \hat{V}_x и \hat{V}_y , по которым затем рассчитывались скорость $\hat{U} = |\hat{V}_x + j\hat{V}_y|$ и направление $\hat{\theta}_V = \arg[\hat{V}_x + j\hat{V}_y]$ ветра (в натурном эксперименте θ_V – угол относительно оси север–юг).

Функция $Q(V_x, V_y)$ была рассчитана на сетке 500×500 с размером ячейки 0,1 м/с ($V_x, V_y \in [-B_V/2, B_V/2]$, $B_V = 50$ м/с). При численном моделировании истинные значения скорости U_t и направления θ_{Vt} ветра задавались равными соответственно 12 м/с и 180° ($V_{xt} = -12$ м/с, $V_{yt} = 0$ м/с). Моделирование проводили при различных SNR.

Используя для каждого SNR по 2000 независимых реализаций оценок \hat{V}_x и \hat{V}_y , мы рассчитали следующие характеристики: $E_U = \sqrt{\langle (\hat{U} - U_t)^2 \rangle}$ – погрешность оценки скорости ветра, $E_\theta = \sqrt{\langle (\hat{\theta}_V - \theta_{Vt})^2 \rangle}$ – погрешность оценки направления ветра и вероятность P того, что оценки \hat{V}_x и \hat{V}_y одновременно удовлетворяют условиям $|\hat{V}_x - V_{xt}|$ и $|\hat{V}_y - V_{yt}|$ меньше 1 м/с.

На рис. 1–3 представлены результаты расчетов зависимостей E_U , E_θ и P от SNR при угле места $\varphi = 15^\circ$.

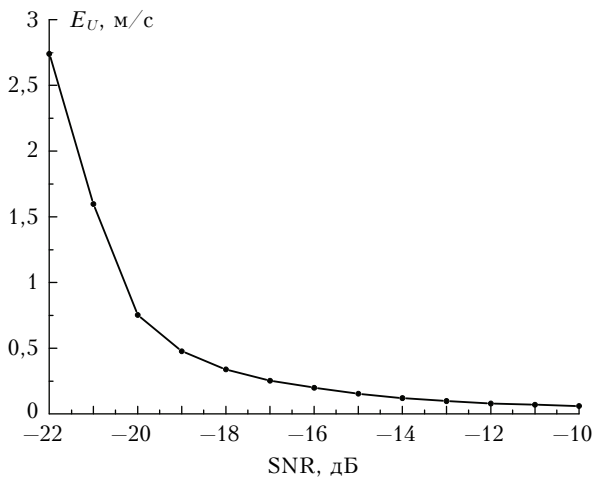


Рис. 1. Зависимость погрешности измерения лидаром скорости ветра от отношения сигнал-шум

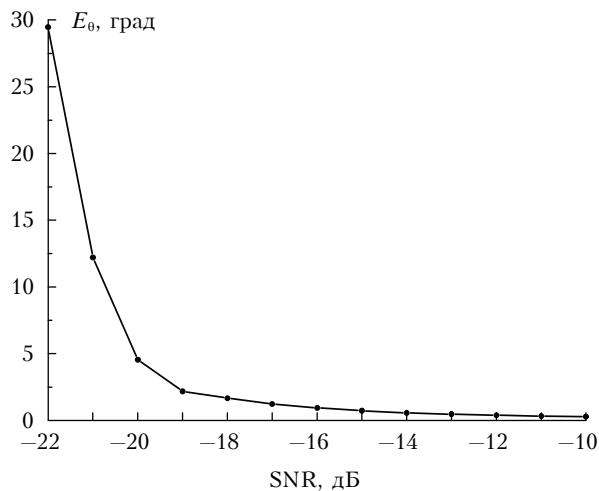


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения лидаром направления ветра от отношения сигнал-шум

Как показали численные эксперименты, варьирование угла φ от 0 до 30° дает незначительное отличие от результатов, представленных на рис. 1–3. Видно (см. рис. 1 и 2), что для выполнения условий $E_U < 1$ м/с и $E_\theta < 5^\circ$ отношение сигнал-шум должно быть не меньше -20 дБ (или $0,01$). Как следует из рис. 3, при $\text{SNR} = -20$ дБ вероятность P составляет примерно 80% .

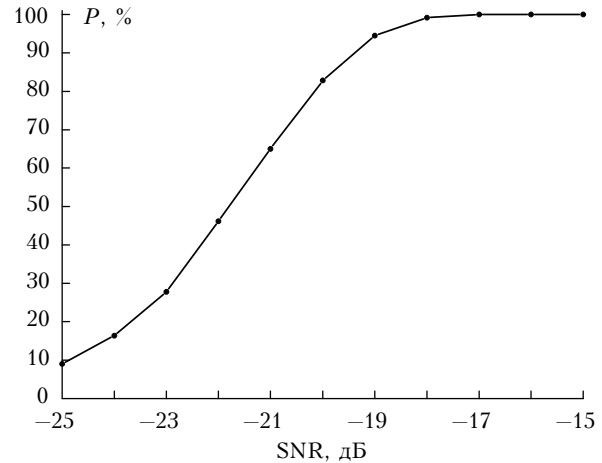


Рис. 3. Зависимость вероятности оценок \hat{V}_x и \hat{V}_y , одновременно удовлетворяющих условиям $|\hat{V}_x - V_{xt}| < 1$ м/с и $|\hat{V}_y - V_{yt}| < 1$ м/с, от отношения сигнал-шум

2. Эксперимент

Для восстановления высотных профилей скорости $U(h)$ и направления ветра $\theta_V(h)$ были использованы данные, измеренные 2-микронным импульсным КДЛ [15] 15 сентября 2003 г. на юго-востоке штата Колорадо (США) [16–18]. Во всех измерениях зондирующий пучок фокусировался на расстояние $1,5$ км. Кроме лидара в эксперименте были задействованы четыре акустических анемометра, установленных на 120-метровой метеорологической мачте (на высотах $54, 67, 85$ и 116 м). Расстояние между мачтой и контейнером с лидаром составляло 167 м. Во время лидарных измерений применялось коническое сканирование зондирующим пучком под разными углами места ($\varphi = 1, 2, 4, 7, 9, 11, 15, 16$ и 30°).

Из исходных лидарных данных были получены массивы оценок автоковариационной функции $\hat{C}_Z(l, R_l, \theta_n)$ для расстояний

$$R_l = R_0 + l' \Delta R,$$

где $R_0 = 190$ м, $\Delta R = 30$ м; $l' = 0, 1, 2, \dots, N_R - 1$ и $N_R = 293$ ($R_{N_R-1} \approx 9$ км). Для приведенных выше значений угла φ разрешение по высоте $\Delta h = \Delta R \sin \varphi$ (толщина вертикального слоя) варьируется от $0,5$ м при $\varphi = 1^\circ$ до 15 м при $\varphi = 30^\circ$. Получаемая с использованием (3) оценка отношения сигнал-шум является несмещенной ($\langle \hat{\text{SNR}} \rangle = \text{SNR}$). В силу того что статистика шумовой составляющей измеряемого сигнала гауссова, при условии $\text{SNR} \ll 1$ относительная погрешность оценки отношения сигнал-шум $E_{\text{SNR}} = \sqrt{\langle \hat{\text{SNR}}^2 \rangle / \text{SNR}^2 - 1}$ описывается формулой

$$E_{\text{SNR}} = (\text{SNR} \sqrt{N_s})^{-1}, \quad (15)$$

где N_s – число отсчетов сигнала, используемых для получения оценки $\hat{\text{SNR}}$. Выше было показано, что оценка вектора скорости ветра с приемлемой точностью возможна при условии $\text{SNR} \geq 10^{-2}$. В соответствии с (2) и (3) $N_s = N_p M = 120\,000$. Тогда, согласно

(15), при $SNR = 10^{-2}$ относительная погрешность оценки равна примерно 30%. Вместо одного вертикального слоя, как это делается в (3), для повышения точности (см. ниже) при оценивании отношения сигнал-шум используется 5 слоев ($N_s = 6 \cdot 10^5$). В этом случае при $SNR = 10^{-2}$ погрешность составляет 13%. Высотные профили скорости и направления ветра восстанавливались из радиальных скоростей $\dot{V}_r(R_r, \theta_r)$, измеренных за одно полное сканирование

(в течение 1 мин), с использованием ПСП и ФСП. Из данных акустического анемометра также определялись скорость и направление ветра. При этом чтобы объемы выборки в случае лидара и акустических анемометров были сопоставимы, использовалось 5-минутное усреднение горизонтальных компонент вектора скорости ветра, измеряемых этими анемометрами.

На рис. 4 представлены результаты восстановления высотных профилей скорости U и направления

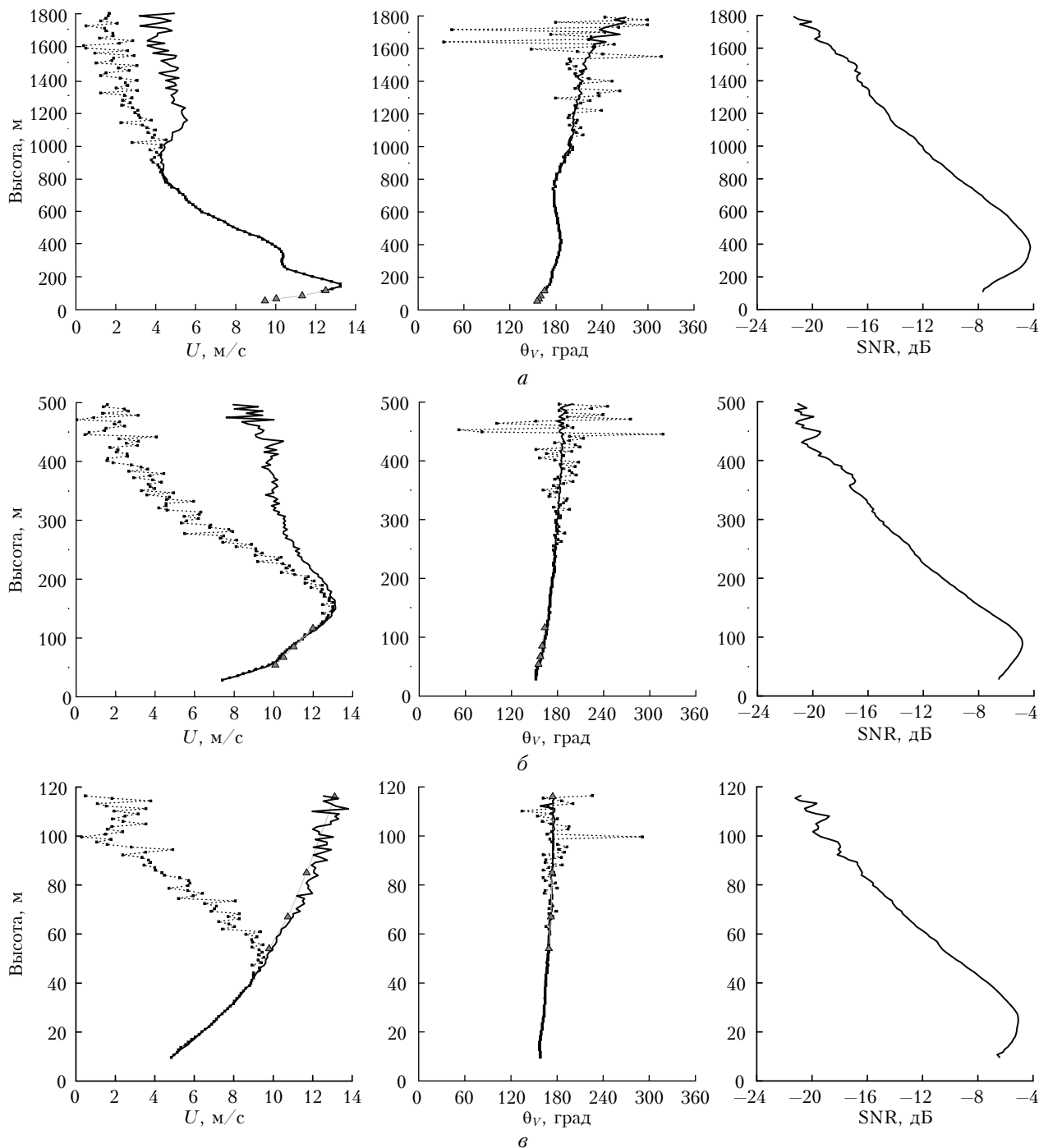


Рис. 4. Результаты восстановления высотных профилей скорости U и направления θ_V ветра и SNR из исходных данных, измеренных лидаром 15.09.2003 г. в 01:58 при $\varphi = 30^\circ$ (а), в 02:02 при $\varphi = 7^\circ$ (б) и 02:32 при $\varphi = 2^\circ$ (в). Профили ветра получены с использованием ПСП (пунктирные кривые) и ФСП (сплошные). Треугольниками показаны результаты одно-временных измерений акустическими анемометрами при использовании 5-минутного усреднения

θ_V ветра и отношения сигнал-шум SNR из данных, измеренных лидаром при различных углах места ϕ , с использованием ПСП и ФСП.

Видно, что при $SNR \geq -10$ дБ методы ПСП и ФСП дают практически совпадающие результаты, так как вероятность «плохой» оценки радиальной скорости ветра пренебрежимо мала. При уменьшении SNR с высотой, вследствие роста числа «плохих» оценок радиальной скорости, вне зависимости от действительного высотного хода скорости ветра, оцениваемая скорость с помощью ПСП имеет тенденцию к уменьшению из-за смещения такой оценки, что и было отмечено выше. При этом на максимальных высотах, где SNR равна примерно -20 дБ, наблюдается наибольшее расхождение в результатах, даваемых ПСП и ФСП. Также видно, что с высотой амплитуда случайного «дриблинга» сплошных кривых постепенно увеличивается, т.е. погрешность оценки, получаемой методом ФСП, медленно растет. Выше максимальных высотных уровней (см. рис. 4) такая погрешность с высотой быстро растет и становится неприемлемо большой.

Для того чтобы сделать вывод о репрезентативности оценок скорости и направления ветра, получаемых с помощью ФСП при $SNR \geq -20$ дБ, необходимо провести сравнение результатов одновременных измерений лидаром и акустическими анемометрами. На рис. 4, а такое сравнение возможно лишь для высоты $h = 116$ м. Результаты, показанные на рис. 4, б, можно сравнить для всех четырех высот расположения акустических анемометров. При этом SNR больше -10 дБ. Когда же угол места $\phi = 2^\circ$ (см. рис. 4, в), результаты лидарных измерений на высотах расположения акустических анемометров получены при SNR меньше -10 дБ и на высоте h , равной 116 м, $SNR \approx -20$ дБ. На рис. 4 видно удовлетворительное согласие результатов одновременных

измерений скорости и направления ветра лидаром (метод ФСП) и акустическими анемометрами.

Показанные на рис. 4 высотные лидарные профили скорости и направления ветра восстановлены с разрешением $\Delta h = \Delta R \sin \phi$. Когда угол ϕ равен 2° (рис. 4, в), разрешение составляет всего 1 м. Если же при оценивании вектора скорости ветра методом ФСП воспользоваться данными измерений из пяти вертикальных слоев, что эквивалентно использованию данных из одного слоя при пяти полных сканированиях, разрешение станет хуже (при $\phi = 2^\circ \Delta h = 5 \Delta R \sin \phi = 5$ м), но точность оценки \hat{V} возрастет. В этом случае при условии $SNR \geq -20$ дБ погрешность компонент вектора \hat{V} примерно в $\sqrt{5}$ раз меньше, чем при использовании данных из одного вертикального слоя. Кроме того, использование данных из 5 слоев позволяет увеличить дальность измерения скорости ветра. Так, при угле $\phi = 30^\circ$ профили скорости и направления ветра могут быть восстановлены из лидарных данных с помощью ФСП почти до 2-км высоты. При получении представленных ниже результатов мы использовали один слой, когда $SNR \geq -10$ дБ, и 5 слоев, когда $SNR < -10$ дБ.

На рис. 5 показан временной ход скорости ветра, измеренной акустическими анемометрами на различных высотах (кривые).

Здесь же в виде различных значков представлены результаты лидарных измерений скорости. Такие измерения были проведены при $\phi = 2^\circ$. Так же, как и для данных, приведенных на рис. 4, в, на высотах расположения акустических анемометров выполнялось условие: $-10 \text{ дБ} \leq SNR \leq -20 \text{ дБ}$, при котором ПСП дает смещенную оценку скорости ветра. Поэтому данные лидарных измерений обрабатывались с использованием ФСП. Видно удовлетворительное

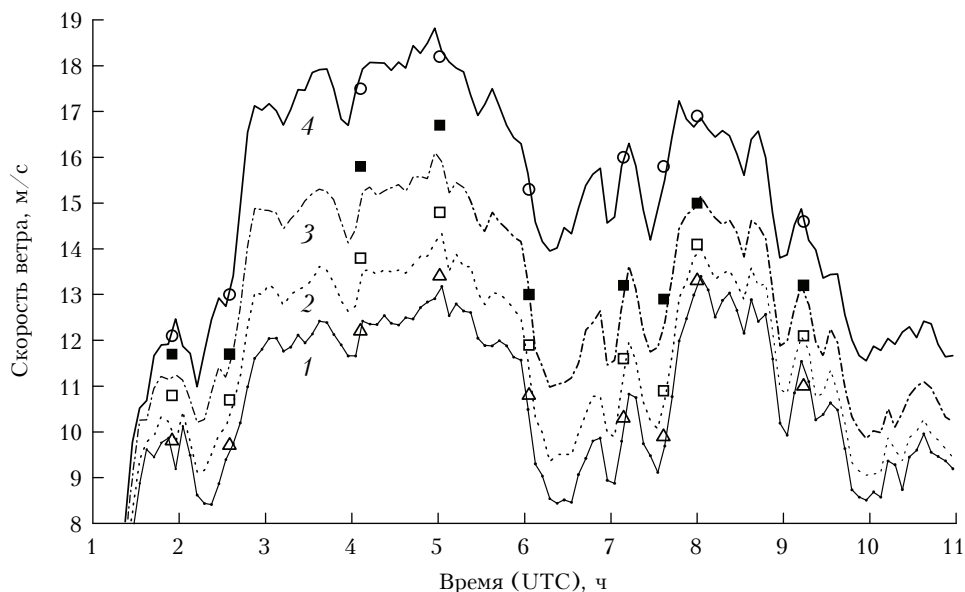


Рис. 5. Зависимости скорости ветра, измеренные акустическими анемометрами на высоте 54 (1), 67 (2), 85 (3) и 116 м (4) от времени. Значками показаны результаты лидарных измерений при $\phi = 2^\circ$ на высоте 54 м (треугольники), 67 м (светлые квадраты), 85 м (черные квадраты) и 116 м (кружки)

согласие результатов измерения скорости ветра акустическими анемометрами и КДЛ. При этом наибольшее отклонение не превышает 0,5 м/с, несмотря на нестационарность и неоднородность ветрового потока. Интересно отметить, что на высоте h , равной 116 м, где $SNR \approx -20$ дБ, результаты измерения акустическим анемометром и лидаром почти полностью совпадают. Таким образом, можно сделать вывод, что, как и в теории (см. выше), метод ФСП позволяет получать приемлемые оценки скорости и направления ветра из данных, измеряемых лидаром в условиях слабого эхосигнала вплоть до значений, равных $SNR = -20$ дБ.

На рис. 6 показано, как изменялись высотные профили скорости (жирные кривые) и направления (тонкие кривые) ветра во время измерения лидаром 15 сентября 2003 г. с 00:42 до 08:04 UTC времени (местное время = UTC время минус 6 ч).

Из данных, измеренных лидаром при $\varphi = 30^\circ$, минимальная высота, на которой можно получить оценку скорости ветра, составляет примерно 100 м. Так как во время проведения эксперимента после завершения одного полного сканирования зондирующим пучком быстро изменялся угол места φ и сканирование повторялось, мы имели возможность оценивать скорости (углы направления) ветра на высотах $h < 100$ м и затем этот профиль (когда, например, $\varphi = 2$ или 7°) «сшивать» с профилем, получаемым при $\varphi = 30^\circ$. Рис. 6 наглядно иллюстрирует эволюцию струйного течения, образующегося в пограничном слое атмосферы начиная примерно с 20 ч местного времени. Использование ФСП позволяет в 2 раза увеличить максимальную высоту измерения лидаром скорости и направления ветра по сравнению с ПСП и проследить изменения скорости и направления ветрового потока в нижних слоях свободной атмосферы до высоты ~ 2 км.

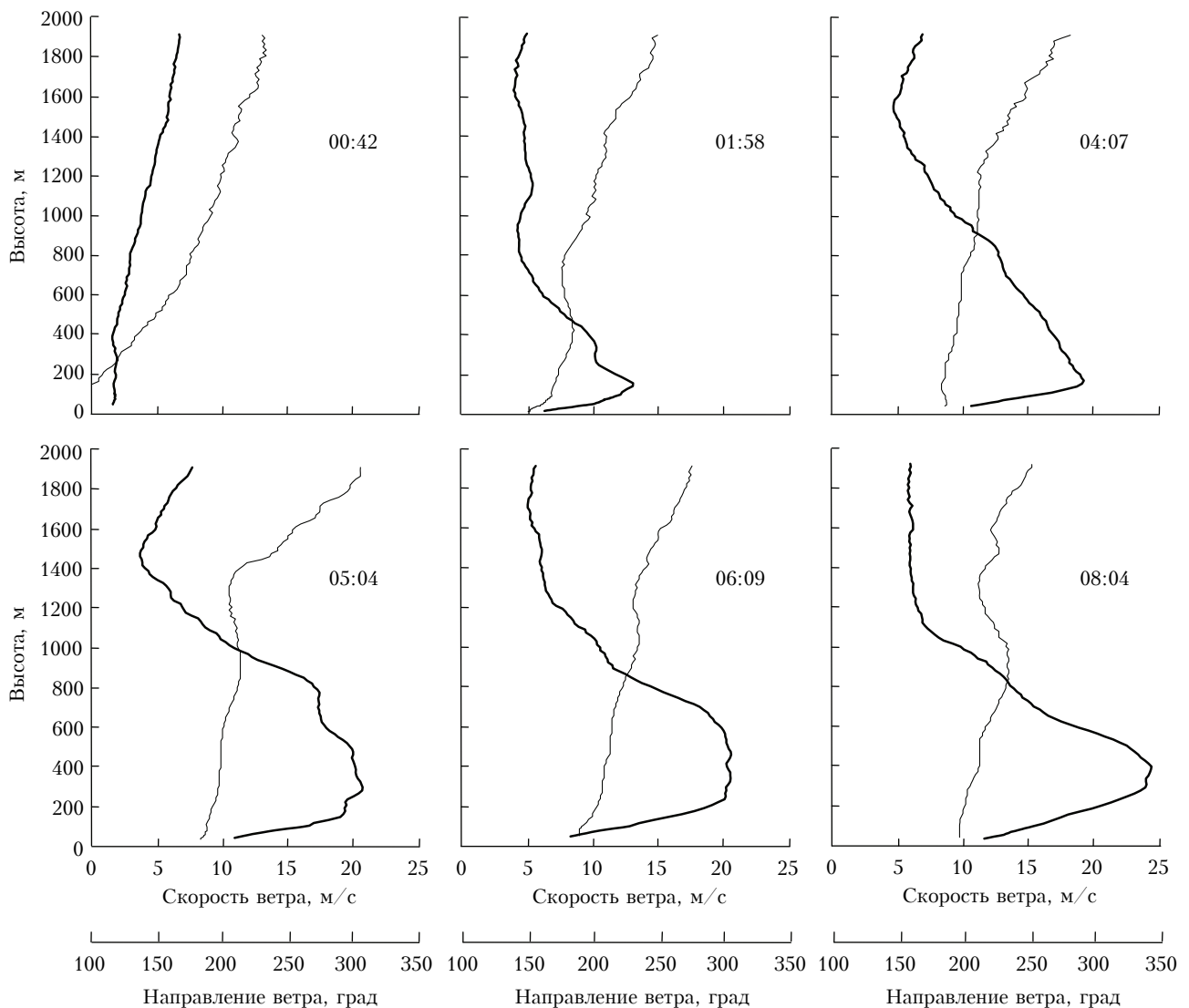


Рис. 6. Высотные профили скорости (жирные кривые) и направления (тонкие) ветра, восстановленные из измеренных лидаром данных. У кривых указано время измерения (UTC)

Заклучение

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование возможностей измерения скорости и направления ветра 2-микронным КДЛ в условиях слабого эхосигнала. Показано, что применение фильтрованной синусоидальной подгонки измеряемых лидаром радиальных скоростей ветра позволяет получать оценки компонент вектора скорости ветра с приемлемой точностью при низких отношениях сигнал-шум вплоть до значений $\text{SNR} \approx -20$ дБ. Представлены результаты восстановления высотных профилей скорости и направления ветра с использованием ФСП из данных, измеряемых лидаром за одно полное сканирование зондирующим пучком в течение 1 мин. Максимальная высота восстановления таких профилей составляет почти 2 км.

Авторы признательны Нейлу Келли из Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии (Голден, штат Колорадо, США) за любезно предоставленные исходные данные акустических анемометров.

1. *Lhermitte R.M., Atlas D.* Precipitation motion by pulse Doppler: Proc. Ninth Weather Radar Conf. Kansas City, MO // Amer. Meteorol. Soc. 1961. P. 218–223.
2. *Doviak R.J., Zrnic D.S.* Doppler lidar and Weather Observation. New York: Academic Press, 1984. 458 p.
3. *Werner Ch.* Fast sector scan and pattern recognition for a cw laser Doppler anemometer // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 20. P. 3557–3564.
4. *Hawley J.G., Tang R., Henderson S.W., Hale C.P., Kavaya M.J., Moerder D.* Coherent launch-site atmospheric wind sounder: theory and experiment // Appl. Opt. 1993. V. 32. N 24. P. 4557–4567.
5. *Smalikho I.N.* Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent Doppler lidar // J. Atmos. and Ocean. Technol. 2003. V. 20. N 2. P. 276–291.
6. *Clifford S.F., Wandzura S.* Monostatic heterodyne lidar performance: The effect of the turbulent atmosphere // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 3. P. 514–516.
7. *Frehlich R.G., Kavaya M.J.* Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence // Appl. Opt. 1991. V. 30. N 36. P. 5325–5352.
8. *Zrnic D.S.* Estimation of spectral moments of weather echoes // IEEE Trans. Geosci. Electron. 1979. V. 17. N 4. P. 113–128.
9. *Frehlich R., Yadlowsky M.J.* Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar // J. Atmos. and Ocean. Technol. 1994. V. 11. N 5. P. 1217–1230.
10. *Rye B.J., Hardesty R.M.* Detecting techniques for validating Doppler estimates in heterodyne lidar // Appl. Opt. 1997. V. 36. N 9. P. 1940–1951.
11. *van Trees H.L.* Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I. New York: John Wiley and Sons, 1968. 697 p.
12. *Salamitou P., Dabas A., Flamant P.H.* Simulation in the time domain for heterodyne coherent laser radar // Appl. Opt. 1995. V. 34. N 3. P. 499–506.
13. *Frehlich R.* Effect of wind turbulence on coherent Doppler lidar measurements // J. Atmos. and Ocean. Technol. 1997. V. 14. N 1. P. 54–75.
14. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Оценивание скорости диссипации турбулентной энергии из данных импульсного доплеровского лидара // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 12. С. 1524–1538.
15. *Grund C.J., Banta R.M., George J.L., Howell J.N., Post M.J., Richter R.A., Weickman A.M.* High-resolution Doppler lidar for boundary layer and cloud research // J. Atmos. and Ocean. Technol. 2001. V. 18. N 3. P. 376–393.
16. *Kelley N., Shirazi M., Jager D., Wilde S., Adams J., Buhl M., Sullivan P., Patton E.* Lamar Low-Level jet program – Interim Report. National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. NREL Report TP-500-34593. 2004. 216 p.
17. *Pichugina Y.L., Banta R.M., Kelley N.D., Brewer W.A.* Nocturnal boundary layer height estimate from Doppler lidar measurements // 18th Sympos. on Boundary Layer and Turbulence. Stockholm, Sweden. June 2008. 7B.6.
18. *Банах В. А., Смалихо И.Н., Пичугина Е.Л., Брюер А.* Репрезентативность измерений скорости диссипации энергии турбулентности сканирующим когерентным доплеровским лидаром // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22. № 10. С. 966–972.

V.A. Banakh, A. Brewer, E.L. Pichugina, I.N. Smalikho. Wind velocity and direction measurement with a coherent Doppler lidar under conditions of weak echo signal.

The possibility to measure wind velocity and direction with a 2- μm pulsed coherent Doppler lidar under conditions of weak echo signal is investigated. It is shown that the use of the filtered sine wave fitting of the radial wind velocities, measured by the lidar, allows us to obtain estimates of the wind velocity vector components with acceptable accuracy under low signal-to-noise ratio up to values of -20 dB.