

УДК 551.511.6:621.371

Эффективность метода МФАС для определения вектора скорости ветра из измерений лидаром Windcube 200s

A. Stephan¹, N. Wildmann¹, И.Н. Смалихо^{2*}

¹*Institute of Atmospheric Physics of the German Aerospace Center (DLR)
82234, Oberpfaffenhofen-Wessling Münchener Straße 20, Germany*

²*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия*

Поступила в редакцию 11.05.2018 г.

Впервые применен метод максимума функции аккумулярованных спектров (МФАС) для оценивания вектора скорости ветра из измерений микроимпульсным когерентным доплеровским лидаром (МИКДЛ) при коническом сканировании зондирующим пучком. В эксперименте с МИКДЛ Windcube 200s установлено, что использование МФАС позволяет увеличить максимальную высоту восстановления вертикальных профилей скорости и направления ветра в среднем на 30% по сравнению с фильтрованной синусоидальной подгонкой.

Ключевые слова: когерентный доплеровский лидар, скорость и направление ветра; coherent Doppler lidar, velocity and direction of wind.

Введение

Для получения информации о скорости и направлении ветра из исходных данных когерентного доплеровского лидара, как правило, во время измерения применяют коническое сканирование зондирующим пучком вокруг вертикальной оси, когда угол места φ фиксирован, а азимутальный угол θ изменяется с постоянной скоростью. Точность лидарной оценки вектора скорости ветра $\mathbf{V} = \{V_z, V_x, V_y\}$ в наибольшей степени зависит от отношения сигнал-шум (SNR) и способа обработки данных. Самым простым методом оценивания компонент \mathbf{V} является прямая синусоидальная подгонка (ПСП) [1–3], которая эффективна лишь при нулевой вероятности P_b плохой (ложной) оценки радиальной скорости. При низком SNR вероятность P_b становится ненулевой, для этого случая в [3] предложены методы фильтрованной синусоидальной подгонки (ФСП) и максимума функции аккумулярованных спектров (МФАС). Методы ФСП и МФАС широко применяются на практике для обработки исходных данных, измеренных двухмикронными импульсными когерентными лидарами. Преимущества метода ФСП, по сравнению с ПСП, ранее продемонстрированы в экспериментах с микроимпульсными когерентными доплеровскими лидарами (МИКДЛ). Согласно теории [3] МФАС дает приемлемый результат при более низком SNR, чем ФСП. Однако для обработки

данных, измеряемых МИКДЛ, метод МФАС ранее не применялся.

В данной работе исследуется эффективность метода МФАС для визуализации ветра из измерений МИКДЛ Windcube 200s (фирма Leosphere, France) [4] при коническом сканировании зондирующим пучком.

Оценивание вектора скорости ветра из измерений лидаром Windcube 200s

Лидар Windcube 200s относится к семейству оптоволоконных МИКДЛ, характеризующихся относительно небольшой энергией зондирующего импульса и высокой частотой следования импульсов f_p . Исходными данными, измеряемыми таким прибором при коническом сканировании зондирующим пучком, является массив оценок спектров мощности лидарного сигнала $\hat{S}(f; R, \theta)$, где f – частота и R – расстояние между лидаром и центром зондируемого объема.

Обозначим через $Z(t_i; n)$ последовательность отсчетов сигнала, снимаемых с АЦП во время работы МИКДЛ. Здесь $t_i = i\delta t$ – время, отсчитываемое с момента нахождения точки максимума распределения мощности n -го зондирующего импульса по времени в плоскости телескопа лидара; $i = 0, 1, 2, 3, \dots, I$ – номер отсчета; $\delta t = 1/B_0$ – временной интервал между отсчетами; B_0 – полоса пропускания реального сигнала (удвоенная частота Найквиста) и $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ – номер посылки зондирующего импульса в атмосферу. В сигнальном процессоре для получения спектров мощности лидарного сигнала

* Anton Stephan (Anton.Stephan@dlr.de); Norman Wildmann (Norman.Wildmann@dlr.de); Игорь Николаевич Смалихо (smalikh@iao.ru).

используются прямоугольное временное окно $W(t)$ шириной T_W , сравнимое с длительностью импульса τ_p , быстрое преобразование Фурье и аккумуляция данных. В результате работы сигнального процессора получаем оценки спектра мощности лидарного сигнала для различных расстояний R_k и азимутальных углов θ_m , представимые как

$$S(f_i; R_k, \theta_m) = \frac{1}{N_a} \sum_{n'=1}^{N_a} \left| \sum_{i'=0}^{I'-1} W(i'\delta t) Z \left(\frac{2R_k}{c} - \frac{T_W}{2} + i'\delta t; N_a m + n' \right) \times \exp \left(-2\pi j \frac{li'}{T} \right) \right|^2, \quad (1)$$

где $f_l = l\Delta f$ – частота; $l = 0, 1, 2, \dots, L-1$ – номер спектрального канала; $L = I'/2$ – число спектральных каналов; $\Delta f = B_0/I'$ – ширина спектрального канала; $R_k = R_0 + k\Delta R$; $k = 0, 1, 2, \dots, K-1$; ΔR – шаг по дальности зондирования; $\theta_m = m\Delta\theta$; $m = 0, 1, 2, \dots, M-1$; $\Delta\theta = 2\pi/M = N_a\omega_0/f_p$ – разрешение по азимутальному углу; N_a – число посылок импульсов, используемых для спектральной аккумуляции (усреднения); $W(t) = 1$ при $t \leq T_W$ и $W(t) = 0$ при $t > T_W$; c – скорость света и $j = \sqrt{-1}$. Измеряемые спектры лидарного сигнала содержат полезную и шумовую составляющие. На больших расстояниях от лидара при отсутствии облаков на трассе зондирования эхосигнал очень слабый и измеренный спектр представляет собой спектр шума, который обозначим как $S_N(f_i; \theta_m)$. Тогда оценку доплеровского спектра $S_D(f_i; R_k, \theta_m)$, несущего информацию о скорости рассеивающих частиц (переносимых воздушным потоком), можно представить в виде

$$S_D(f_i; R_k, \theta_m) = S(f_i; R_k, \theta_m) - S_N(f_i; \theta_m). \quad (2)$$

Основные параметры лидара Windcube 200s во время эксперимента, описание которого дано ниже, приведены в табл. 1. Согласно этой таблице частотная полоса пропускания $B_0 = 250$ МГц, число спектральных каналов $L = 32$ и, следовательно, ширина спектрального канала $\Delta f = B_0/(2L) = 3,90625$ МГц, что соответствует ширине канала в единицах скорости $\Delta V = (\lambda/2)\Delta f \approx 3$ м/с ($\lambda = 1,543$ мкм – длина волны зондирующего излучения). При таком довольно грубом частотном разрешении оценка радиальной скорости (проекция вектора скорости ветра на опти-

ческую ось зондирующего пучка) из спектра $S_D(f_i; R_k, \theta_m)$ может быть получена с большой погрешностью. Поэтому с помощью Фурье-интерполяции мы осуществляем переход от $S(f_i; R_k, \theta_m)$, $S_N(f_i; \theta_m)$ и $S_D(f_i; R_k, \theta_m)$ к соответствующим спектрам на частотах $f_{l'} = l'\delta f$, где $l' = 0, 1, 2, \dots, LN_F - 1$, $N_F = 64$ и $\delta f = \Delta f/N_F \approx 0,061$ МГц (ширина спектрального канала в единицах скорости $\delta V = (\lambda/2)\delta f \approx 0,047$ м/с).

В рассматриваемом лидаре излучение задающего лазера разделяется на опорный и зондирующий пучки и с помощью акустооптического модулятора частота зондирующего пучка смещается на величину f_{int} , которая называется промежуточной частотой (разность частот опорного и зондирующего излучения). Положение пика в измеряемом спектре на частоте f_{int} соответствует нулевому значению радиальной скорости. С учетом соотношения Доплера оценка радиальной скорости $\hat{V}_r(R_k, \theta_m)$ может быть получена из спектра $S_D(f_{l'}; R_k, \theta_m)$ в интервале частот $f_{l'} \in [f_{\text{int}} - B/2, f_{\text{int}} + B/2]$, где $B = 50$ МГц, по положению спектрального максимума, т.е. $\max\{S_D(f_{l'}; R_k, \theta_m)\} = S_D(f_{\text{max}}; R_k, \theta_m)$ и

$$\hat{V}_r(R_k, \theta_m) = (\lambda/2)[f_{\text{max}}(R_k, \theta_m) - f_{\text{int}}]. \quad (3)$$

Согласно приведенным в табл. 1 данным для T_W и τ_p продольный размер зондируемого объема, определяемый как $\Delta z = (cT_W/2)/\text{erf}(\sqrt{\ln 2}T_W/\tau_p)$ ($\text{erf}(x)$ – интеграл вероятности) [5], равен 36 м.

Кроме радиальной скорости, из спектров $S_D(f_{l'}; R_k, \theta_m)$ и $S_N(f_{l'}; \theta_m)$ можно получить оценку отношения сигнал-шум $\hat{\text{SNR}}(R_k, \theta_m)$, определяемого как отношение мощности лидарного эхосигнала к мощности шума в полосе пропускания $B = 50$ МГц, воспользовавшись формулой

$$\hat{\text{SNR}}(R_k, \theta_m) = \frac{\sum_{l'=L}^{l_{\pm}} S_D(f_{l'}; R_k, \theta_m)}{\sum_{l'=L}^{l_{\pm}} S_N(f_{l'}; \theta_m)}, \quad (4)$$

где $l_{\pm} = [(f_{\text{int}} \pm B/2)/\delta f]$ (прямоугольные скобки означают округление до ближайшего целого числа).

На рис. 1 приведены примеры исходных спектров (без Фурье-интерполяции) $S(f_i; R_k, \theta_m)$, $S_N(f_i; \theta_m)$ и $S_D(f_i; R_k, \theta_m)$ и этих же спектров после Фурье-интерполяции $S(f_{l'}; R_k, \theta_m)$, $S_N(f_{l'}; \theta_m)$ и $S_D(f_{l'}; R_k, \theta_m)$,

Таблица 1

Параметры лидара Windcube 200s

Длина волны λ , мкм	1,543	Число спектральных каналов в диапазоне 0–125 МГц L	32
Энергия импульса E_p , мкДж	50	Разрешение по скорости ΔV , м/с	3
Длительность импульса τ_p , нс	200	Число импульсов для спектральной аккумуляции N_a	4000
Частота следования импульсов f_p , кГц	20	Минимальное расстояние зондирования R_0 , м	100
Промежуточная частота f_{int} , МГц	69,3	Шаг по дальности ΔR , м	50
Полоса пропускания B_0 , МГц	250	Угол места φ , град	35,3
Ширина временного окна T_W , нс	144	Разрешение по азимуту $\Delta\theta$, град	1
Продольный размер объема зондирования Δz , м	36	Продолжительность одного конического сканирования T_{scan} , с	72

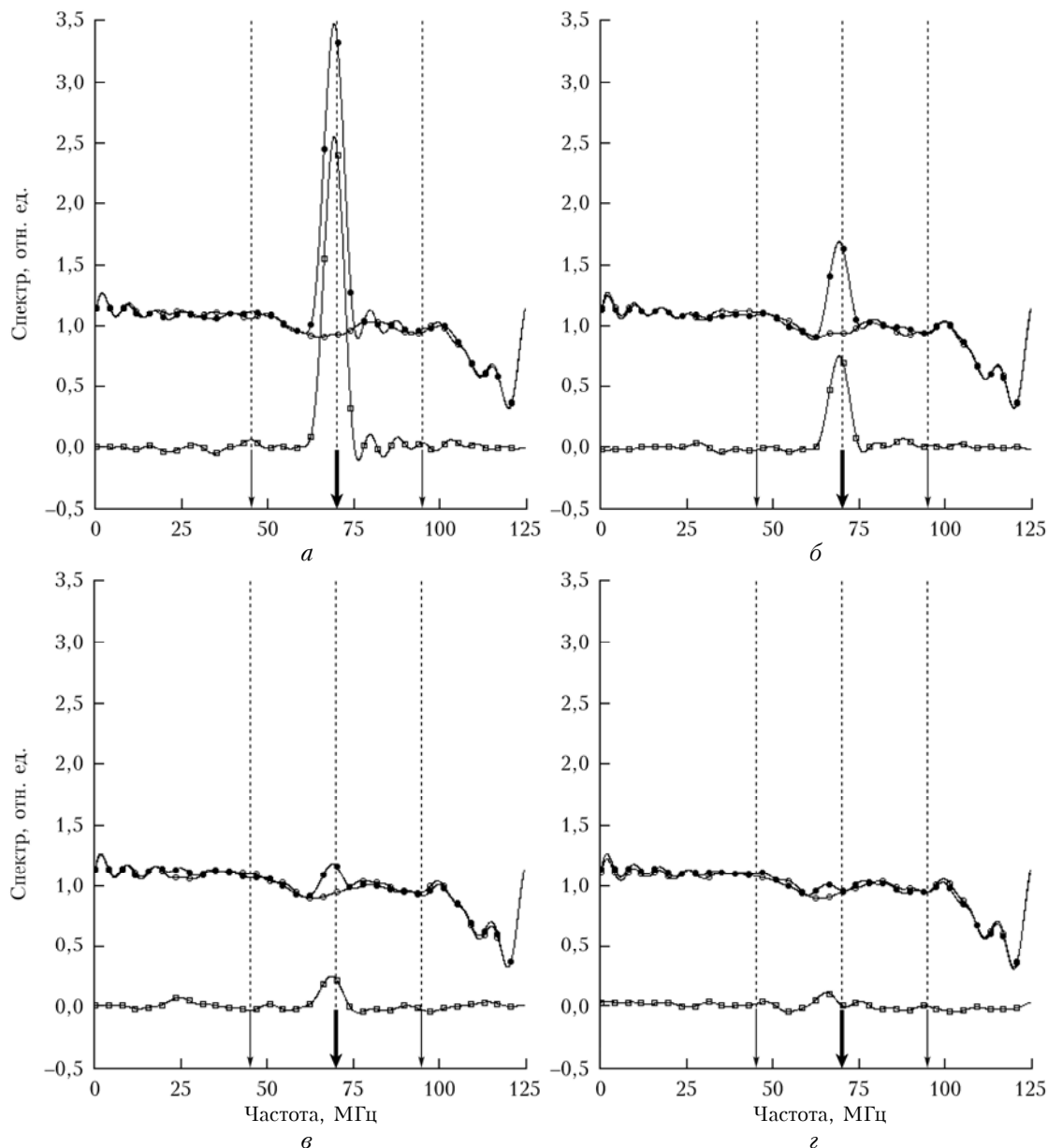


Рис. 1. Исходные спектры $S(f_i; R_k, \theta_m)$, $S_N(f_i, \theta_m)$ и $S_D(f_i; R_k, \theta_m)$ (темные, светлые кружочки и квадратики соответственно) и спектры после Фурье-интерполяции $S(f_r; R_k, \theta_m)$, $S_N(f_r; \theta_m)$ и $S_D(f_r; R_k, \theta_m)$ (сплошные кривые), полученные из измерений лидаром Windcube 200s при SNR = -5 (а), -10 (б), -15 (в) и -20 дБ (г); тонкие стрелки указывают границы полосы пропускания 50 МГц, полужирная стрелка – положение промежуточной частоты

полученных из измерений лидаром Windcube 200s при различном SNR, определяемом по формуле (4).

Отметим, что здесь значения спектров в нулевом и первом каналах ($l = 0$ и $l = 1$) были заменены на значения во втором канале ($l = 2$). Видно, что с уменьшением SNR уменьшается высота спектрального пика, несущего информацию о радиальной скорости ветра. Даже при SNR = -20 дБ оценка радиальной скорости $\hat{V}_r(R_k, \theta_m)$ может быть получена с достаточно высокой точностью благодаря большому числу импульсов, используемых для спектральной аккумуляции ($N_a = 4000$, см. табл. 1).

Если массив оценок радиальной скорости $\hat{V}_r(R_k, \theta_m)$, полученный из измерений лидаром за

одно полное коническое сканирование ($0 \leq \theta_m < 360^\circ$), не содержит плохих оценок или вероятность P_b не превышает 1%, то для определения $\mathbf{V} = \{V_z, V_x, V_y\}$ (V_z – вертикальная, V_x и V_y – горизонтальные компоненты вектора) можно воспользоваться методом ПСП [1–3]. В предположении статистической однородности ветра по горизонтали данный метод заключается в минимизации функционала

$$\rho(\mathbf{V}) = \sum_{m=0}^{M-1} [V_r(R_k, \theta_m) - \mathbf{S}(\theta_m)\mathbf{V}]^2, \quad (5)$$

где $\mathbf{S}(\theta_m) = \{\sin\varphi, \cos\varphi\cos\theta_m, \cos\varphi\sin\theta_m\}$ – единичный вектор вдоль направления m -го луча. Обозначив

через $\hat{\mathbf{V}} = \{\hat{V}_z, \hat{V}_x, \hat{V}_y\}$ оценку вектора скорости ветра, мы имеем соотношение $\min\{\rho(\mathbf{V})\} = \rho(\hat{\mathbf{V}})$. Процедура минимизации функционала (5) сводится к решению системы линейных уравнений $\nabla\rho(\mathbf{V}) = 0$. Здесь оператор $\nabla = \{\partial/\partial V_z, \partial/\partial V_x, \partial/\partial V_y\}$.

При предельно низком SNR положение максимума спектра $S_D(f_r; R_k, \theta_m)$ с существенной долей вероятности может быть связано с флуктуациями шумовой составляющей спектра $S_N(f_r; \theta_m) - \langle S_N(f_r; \theta_m) \rangle$ (угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций). Учитывая, что в частотном интервале $f_r \in [f_{\text{int}} - B/2, f_{\text{int}} + B/2]$ спектр $S_N(f_r; \theta_m)$ близок к белому шуму (см. соответствующие кривые на рис. 1), плохая оценка радиальной скорости (или ложная оценка, связанная с шумовым пиком) может принимать с почти равной вероятностью значения в интервале от $-\lambda B/4$ до $+\lambda B/4$ (от $-19,3$ м/с до $+19,3$ м/с). В этом случае массив $\hat{V}_r(R_k, \theta_m)$ будет содержать большой процент плохих оценок и для определения из этого массива вектора скорости ветра потребуется фильтрация хороших оценок радиальной скорости. В [3] предложено определять \mathbf{V} методом ФСП. Суть метода заключается в следующем. Из полученного массива оценок радиальных скоростей $\hat{V}_r(R_k, \theta_m)$ последовательно для каждой высоты $h_k = R_k \sin\phi$ рассчитывается функция трех переменных V_z, V_x и V_y :

$$Q(\mathbf{V}; h_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \exp \left\{ - \frac{[\hat{V}_r(R_k, \theta_m) - \mathbf{S}(\theta_m)\mathbf{V}]^2}{2\sigma_g^2} \right\}, \quad (6)$$

где σ_g – параметр фильтрации, задаваемый в соответствии с инструментальным уширением доплеровского спектра и неоднородностью поля ветра; $\hat{\mathbf{V}}$ определяется по положению максимума этой функции:

$$\max\{Q(\mathbf{V}; h_k)\} = Q(\hat{\mathbf{V}}; h_k). \quad (7)$$

По сравнению с ПСП метод ФСП позволяет получать приемлемый результат при значительно более низком SNR, что продемонстрировано, в частности, в [3]. Другим способом определения \mathbf{V} из сильно зашумленных лидарных данных является метод МФАС. Воспользовавшись массивом доплеровских спектров, получаемых после Фурье-интерполяции, $S_D(f_r; R_k, \theta_m)$ при $f_r \in [f_{\text{int}} - B/2, f_{\text{int}} + B/2]$, для каждой высоты h_k рассчитывается функция аккумулярованных спектров $F_a(\mathbf{V}; h_k)$ по формуле

$$F_a(\mathbf{V}; h_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} S_D(l(\theta_m, \mathbf{V})\delta f; R_k, \theta_m), \quad (8)$$

где $l(\theta_m, \mathbf{V})$ – округленная до ближайшего целого числа величина $(f_{\text{int}} + (2/\lambda)\mathbf{S}(\theta_m)\mathbf{V})/\delta f$; $\hat{\mathbf{V}}$ определяется по положению максимума этой функции

$$\max\{F_a(\mathbf{V}; h_k)\} = F_a(\hat{\mathbf{V}}; h_k). \quad (9)$$

В отличие от методов ПСП и ФСП при использовании метода МФАС не надо получать оценки радиальной скорости ветра. Суммирование в (8) означает дополнительную аккумуляцию спектров, приводящую к осреднению флуктуаций шумовой составляющей спектра и, следовательно, увеличению вероятности превышения сигнального пика над всеми шумовыми пиками в аккумулярованном спектре. При $N_a = 4000$ и $M = 360$ полное число импульсов, используемых для аккумуляции данных одного полного конического сканирования, $N_a M = 1440000$. До определенных значений SNR точка максимума функции $F_a(\mathbf{V}; h_k)$ представляет собой искомый вектор скорости ветра. Исследование эффективности метода МФАС было проведено нами в численном и натурном экспериментах.

Численный эксперимент

Мы провели численное моделирование, имитирующее измерения лидаром Windcube 200s при коническом сканировании зондирующим пучком. Параметры этого лидара приведены в табл. 1. Для получения доплеровских спектров, несущих информацию о ветре на расстоянии R от лидара, отсчеты лидарных сигналов $Z(t_i; n)$ и шум $Z_N(t_i; n)$ (сигналы, регистрируемые лидаром с большого расстояния) генерировались на компьютере с использованием следующего алгоритма [5–7]:

$$Z(t_i; n) = \text{Re}\{Z_S(t_i; n)\} + Z'_N(t_i; n), \quad (10)$$

где

$$Z_S(t_i; n) = \sqrt{\text{SNR} \frac{2B}{B_0} \frac{\delta R}{\sqrt{\pi} \Delta p}} \sum_{i=0}^{N_p-1} \zeta(i+i'; n) A(i') \times \exp\{2\pi j t_i [f_{\text{int}} + (2/\lambda)V_r(R_{i+i'}, \theta_n)]\} \quad (11)$$

– комплексный эхосигнал; $\delta R = c\delta t/2$; $\Delta p = c\sigma_p/2$; $\sigma_p = \tau_p/(2\sqrt{\ln 2})$; $\zeta(i; n) = \xi_1(i; n) + j\xi_2(i; n)$; $A(i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\delta R}{\Delta p}\left(i - \frac{N_p}{2}\right)\right]^2\right\}$; $V_r(R_i, \theta_n) = \langle V_r(R_i, \theta_n) \rangle + V'_r(R_i, \theta_n)$ – радиальная скорость в точке с координатами $R_i \mathbf{S}(\theta_n)$; $V_r = V_r - \langle V_r \rangle$ – турбулентные флуктуации радиальной скорости; $R_i = R + (i - I_W/2)\delta R$ – расстояние от лидара; $\theta_n = n\omega_0/f_p$ – азимутальный угол; $Z'_N(t_i; n) = \xi_3(i; n)$ – шумовая составляющая сигнала, приходящего от зондируемого объема с центром на расстоянии R ; $Z_N(t_i; n) = \xi_4(i; n)$ – лидарный сигнал, содержащий только шум.

При реализации этого алгоритма моделирования на компьютере генерируются независимые последовательности псевдослучайных величин $\xi_1(i; n)$, $\xi_2(i; n)$, $\xi_3(i; n)$ и $\xi_4(i; n)$, обладающих свойствами белого шума с гауссовой функцией плотности вероятности, нулевым средним и единичной дисперсией. Считая, что поле ветра является статистически од-

нородным, радиальная скорость $V_r(R_i, \theta_n)$ представляется как

$$V_r(R_i, \theta_n) = \langle V_z \rangle \sin \varphi + \langle V_x \rangle \cos \varphi \cos \theta_n + \langle V_y \rangle \cos \varphi \sin \theta_n + V'_r(R_i, \theta_n), \quad (12)$$

где средние значения компонент вектора скорости ветра являются постоянными. Мы провели численный эксперимент, воспользовавшись данными табл. 1, для случая очень слабой ветровой турбулентности, когда в (12) можно положить $V'_r(R_i, \theta_n) = 0$ при $\langle V_z \rangle = 0$, $\langle V_x \rangle = 10$ м/с, $\langle V_y \rangle = 0$ и $\text{SNR} \leq -27$ дБ. Из моделируемых при фиксированном SNR (расстоянии R_k) отсчетов сигнала $Z(t_i; n)$ и шума $Z_N(t_i; n)$ по формулам (1) и (2) рассчитывались спектры $S(f_i; \theta_m)$, $S_N(f_i; \theta_m)$ и $S_D(f_i; \theta_m)$ с последующим применением к $S_D(f_i; \theta_m)$ Фурье-интерполяции.

При таком низком SNR (≤ -27 дБ) ПСП будет давать заведомо неприемлемый результат (сильно смещенная $\hat{\mathbf{V}}$) [3, 5]. Поэтому для обработки моделируемых данных воспользуемся методами ФСП и МФАС, описываемыми формулами (6), (7) и (8), (9) соответственно. Из данных, моделируемых для различных SNR, с использованием по 1000 независимых реализаций (конических сканирований) нами были рассчитаны вероятность P_2 того, что выполняются одновременно условия $|\hat{V}_x - V_x| < 2$ м/с и $|\hat{V}_y - V_y| < 2$ м/с, и среднеквадратическая погрешность оценивания \mathbf{V} , определяемая как $E_V = \sqrt{\langle (\hat{V}_x - V_x)^2 + (\hat{V}_y - V_y)^2 \rangle}$, где $\{\hat{V}_x, \hat{V}_y\}$ – оценка и $\{V_x, V_y\}$ – задаваемое (истинное) значение \mathbf{V} .

В табл. 2 представлены результаты расчетов вероятности P_2 и погрешности E_V для различных SNR.

Таблица 2
Вероятность P_2 и погрешность E_V лидарной оценки вектора скорости ветра

Метод	Параметр	SNR, дБ					
		-32	-31	-30	-29	-28	-27
ФСП	$P_2, \%$	32	49	71	88	97	100
	$E_V, \text{м/с}$	11,2	9,7	6,1	4,0	1,5	0,7
МФАС	$P_2, \%$	72	89	99	100	100	100
	$E_V, \text{м/с}$	6,6	3,8	1,4	0,7	0,55	0,4

Видно, что для обработки лидарных данных методом ФСП вероятность приемлемой оценки \mathbf{V} составит не менее 99% при превышении SNR примерно -27,5 дБ. В то время как МФАС позволяет получать результат с такой точностью при SNR не менее -30 дБ. Таким образом, как следует из результатов численного моделирования, метод МФАС позволяет получать корректные оценки вектора скорости ветра при SNR на 2,5 дБ ниже (в 1,8 раза меньше), чем в случае использования ФСП.

Натурный эксперимент

В октябре 2017 г. нами был проведен лидарный эксперимент в г. Оберпфaffenхофен. Лидар Wind-

cube 200s был установлен на крыше здания Института физики атмосферы Германского аэрокосмического центра (DLR) (рис. 2). Непрерывные измерения этим лидаром с использованием конического сканирования при угле места $\varphi = 35,3^\circ$ были выполнены с 12:00 (здесь и далее местное время) 16.10 до 08:00 19.10.2017 г. Параметры лидара, измерения и обработки данных такие же, как и в численном эксперименте (см. табл. 1).



Рис. 2. МИКДЛ Windcube 200s, установленный на крыше здания Института физики атмосферы Германского аэрокосмического центра, во время лидарного эксперимента 16–19.10.2017 г.

Из полученных спектров $S_D(f_i; R_k, \theta_m)$ и $S_N(f_i; \theta_m)$ мы определяли $\hat{\text{SNR}}(R_k, \theta_m)$ по формуле (4). При условии $\text{SNR} = 1$ относительная погрешность оценки отношения сигнал-шум $E_{\text{SNR}} = \sqrt{\langle (\hat{\text{SNR}}/\text{SNR} - 1)^2 \rangle}$ описывается формулой [5]

$$E_{\text{SNR}} = \left(\sqrt{T_W B N_a} \text{SNR} \right)^{-1}, \quad (13)$$

где SNR – истинное отношение сигнал-шум. С учетом того, что $T_W = 144$ нс, $B = 50$ МГц и $N_a = 4000$ (см. табл. 1), величина E_{SNR} не будет превышать 0,3 при условии $\text{SNR} \geq 0,0196$ (-17 дБ). Согласно данным табл. 2 метод МФАС позволяет получать приемлемый результат при $\text{SNR} \geq -30$ дБ. Чтобы определить SNR, равное -30 дБ, с относительной погрешностью E_{SNR} не более 0,3, необходимо усреднить все оценки $\hat{\text{SNR}}(R_k, \theta_m)$ из измерений за одно полное коническое сканирование, т.е. получить усредненную оценку как

$$\bar{\text{SNR}}(R_k) = M^{-1} \sum_{m=0}^{M-1} \hat{\text{SNR}}(R_k, \theta_m). \quad (14)$$

При таком усреднении относительная погрешность E_{SNR} уменьшится в \sqrt{M} раз, где число лучей $M = 360$ (разрешение по азимутальному углу $\Delta\theta = 1^\circ$; см. табл. 1).

Для получения оценок $\hat{\mathbf{V}} = \{\hat{V}_z, \hat{V}_x, \hat{V}_y\}$ из измерений лидаром Windcube 200s мы воспользовались методами ПСП, ФСП и МФАС. Скорость ветра U

и угол направления ветра θ_V рассчитывались по формулам $U = |\hat{V}_x + j\hat{V}_y|$ и $\theta_V = \arg\{\hat{V}_x + j\hat{V}_y\}$. Последовательно из данных каждого конического сканирования мы получали оценки $\overline{\text{SNR}}$, U , θ_V и \hat{V}_z на различных высотах $h_k = R_k \sin\varphi = h_0 + k\Delta h$. Согласно данным табл. 1 начальная высота (над уровнем лидара) $h_0 = 57,8$ м и шаг по высоте $\Delta R \sin\varphi = 28,9$ м. После завершения очередного конического сканирования через десятые доли секунды начиналось следующее сканирование. Продолжительность одного конического сканирования, определяемого как $T_{\text{scan}} = M\Delta t$, где $M = 360$ и $\Delta t = N_a/f_p = 0,2$ с, составляет 72 с. С помощью описанных выше алгоритмов из измерений лидаром Windcube 200s мы осуществляли пространственно-временную визуализацию отношения сигнал-шум и ветра, т.е. получали двумерные распределения $\overline{\text{SNR}}(h_k, t_n)$, $U(h_k, t_n)$, $\theta_V(h_k, t_n)$ и $\hat{V}_z(h_k, t_n)$. Здесь время $t_n = t_0 + nT_{\text{scan}}$ и $n = 0, 1, 2, \dots$

На рис. 3 представлен результат пространственно-временной визуализации для $\overline{\text{SNR}}(h_k, t_n)$ из измерений лидаром Windcube 200s 17.10.2017 г. Видно, что в течение суток происходили существенные изменения уровня лидарного эхосигнала. Относительная погрешность оценок SNR не превышает 10% на высотах не ниже 900 м. Согласно численному моделированию метод ПСП позволяет получать приемлемый результат при условии $\text{SNR} \geq -20$ дБ, в то время как методы ФСП и МФАС – при условиях $\text{SNR} \geq -27,5$ дБ и $\text{SNR} \geq -30$ дБ соответственно (см. табл. 2). Тогда, исходя из данных рис. 3, мы можем ожидать существенного увеличения максимальной высоты восстановления профилей ветра при использовании ФСП и МФАС по сравнению с ПСП.

На рис. 4 представлены распределения скорости ветра $U(h_k, t_n)$, угла направления ветра $\theta_V(h_k, t_n)$

и вертикальной компоненты вектора ветра $\hat{V}_z(h_k, t_n)$, полученные из измерений Windcube 200s 17.10.2017 г. тремя способами: ПСП, ФСП и МФАС. По рис. 4 можно лишь визуально судить о возможностях этих методов, исходя из размеров площадей, в пределах которых полученные распределения являются гладкими. Очевидно, что резкое изменение оценок направления ветра с высотой или временем свидетельствует о большой их погрешности. Видно, что площадь «гладкости» наибольшая в случае использования МФАС и наименьшая – ПСП.

Так как истинное значение \mathbf{V} нам неизвестно, в качестве такового выберем значения $\bar{\mathbf{V}} = \{\bar{V}_z, \bar{V}_x, \bar{V}_y\}$, полученные методом МФАС и усредненные по $N' = 24$ сканированиям (30-минутное усреднение) с использованием фильтрации данных, т.е. по аналогии с (6)–(7) воспользуемся следующим алгоритмом:

$$\max\{Q_V(\mathbf{V}; h_k, t_n)\} = Q(\bar{\mathbf{V}}; h_k, t_n), \quad (15)$$

где

$$Q_V(\mathbf{V}; h_k, t_n) = \sum_{n'=0}^{N'} \exp \left\{ - \frac{[\hat{\mathbf{V}}^{(3)}(h_k, t_n + (n' - N'/2)T_{\text{scan}}) - \mathbf{V}]^2}{2\sigma_g^2} \right\} \quad (16)$$

и $\hat{\mathbf{V}}^{(3)}(h_k, t_n)$ – оценка вектора скорости, полученная из измерений лидаром при одном (n -м) сканировании с использованием метода МФАС.

На рис. 5 представлены распределения скорости и направления ветра после применения процедуры, описываемой формулами (15) и (16). Такая процедура позволяет существенно улучшить результат

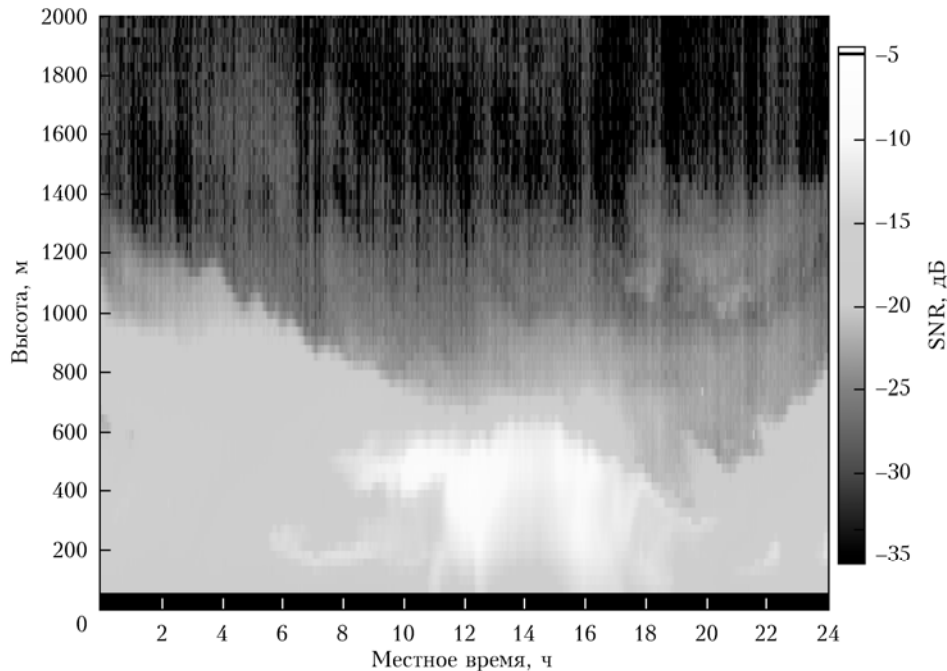


Рис. 3. Распределение SNR по высоте и времени, полученное из измерений лидаром Windcube 200s 17.10.2017 г.

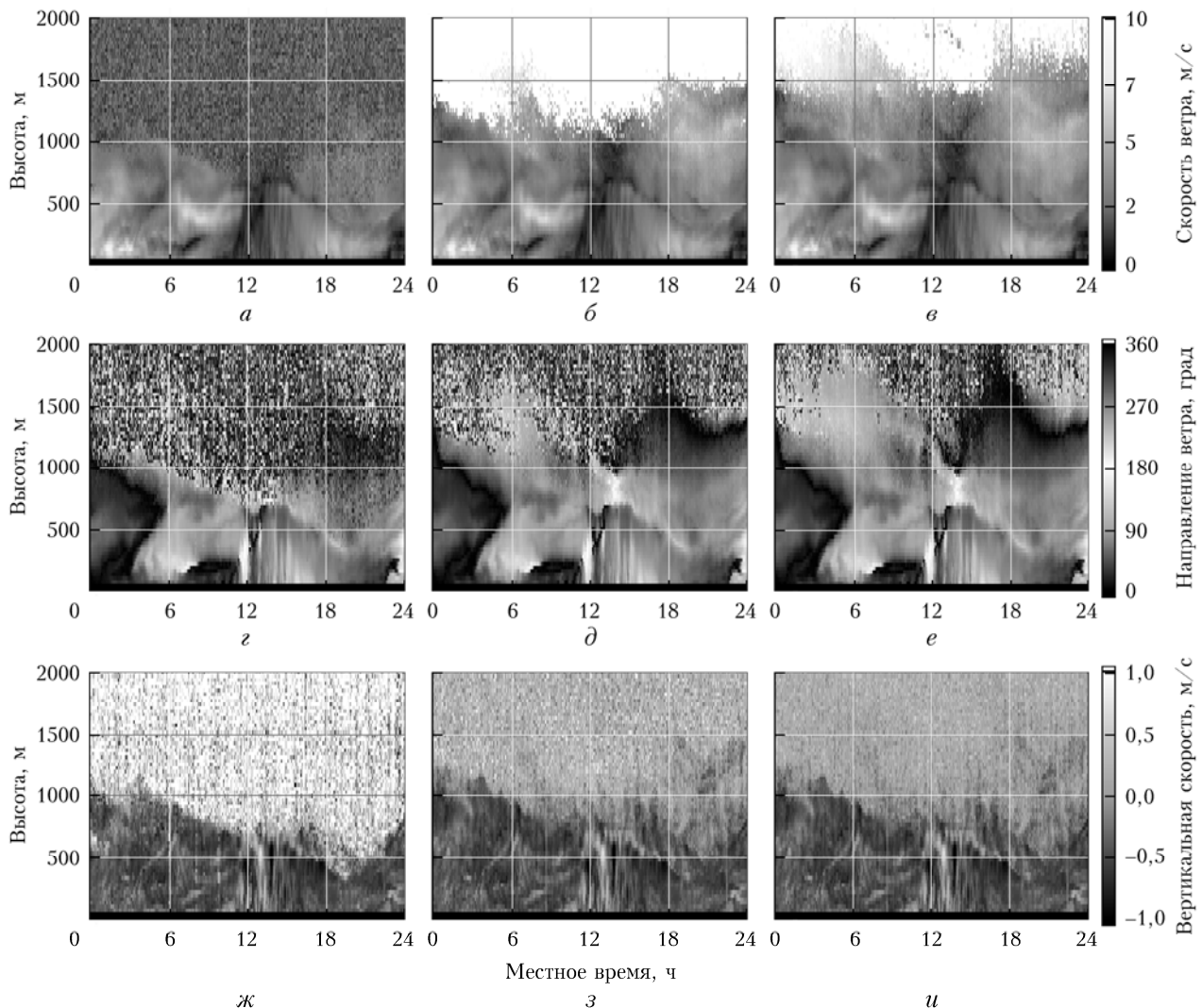


Рис. 4. Распределения скорости ветра (*a–в*), угла направления ветра (*г–е*) и вертикальной компоненты вектора скорости ветра (*ж–и*) по высоте и времени, полученные из измерений лидаром Windcube 200s 17.10.2017 г. с использованием методов ПСП (*a, г, ж*), ФСП (*б, д, з*) и МФАС (*в, е, и*)

(рис. 4, *в, е* и рис. 5). На рис. 5 видно, что резкие изменения оценок скорости и направления ветра имеют место в основном в прямоугольнике с ребрами 1500–2000 м и с 06:00 до 18:00. Из данных рисунка следует, что полученные распределения для ветра являются достаточно гладкими для высот не более 1445 м, которые были использованы нами как эталонные (истинные). Как и в численном эксперименте, из результатов лидарных измерений в течение суток 17.10.2017 г. мы рассчитали вероятность P_2 того, что выполняются одновременно условия $|\hat{V}_x^{(n)} - \bar{V}_x| < 2 \text{ м/с}$ и $|\hat{V}_y^{(n)} - \bar{V}_y| < 2 \text{ м/с}$, и среднеквадратическую погрешность оценивания \mathbf{V} , определяемую как $E_V = \sqrt{\langle (\hat{V}_x^{(n)} - \bar{V}_x)^2 + (\hat{V}_y^{(n)} - \bar{V}_y)^2 \rangle}$, где $\{\hat{V}_x, \hat{V}_y\}$ – оценка, полученная за одно сканирование. Индекс $n = 1$ соответствует методу ПСП, $n = 2$ – ФСП и $n = 3$ – МФАС. Так как метод ПСП менее эффективен, чем ФСП и МФАС, проведем сравнение точности последних.

На рис. 6 представлены высотные профили SNR, а также погрешности E_V и вероятности P_2 в случаях применения ФСП и МФАС. Видно, что достоверные (с вероятностью P_2 не менее 99%) оценки \mathbf{V} имеют место при $\text{SNR} > -27 \text{ дБ}$ в случае ФСП и при $\text{SNR} > -30 \text{ дБ}$ в случае МФАС, что хорошо согласуется с результатами численного эксперимента (см. табл. 2). Так как ПСП может дать приемлемый результат только при $\text{SNR} \geq -20 \text{ дБ}$, то с учетом SNR (рис. 6) использование данного метода для обработки лидарных измерений в этот день позволило восстановить высотные профили ветра в среднем до высоты 700 м. Применяя методы ФСП и МФАС, профили ветра восстанавливаются в среднем до высот 1000 и 1300 м соответственно.

Данный анализ показал, что метод МФАС является наиболее эффективным из рассмотренных здесь. Превышение максимальной высоты восстановления профилей вектора ветра этим методом в среднем

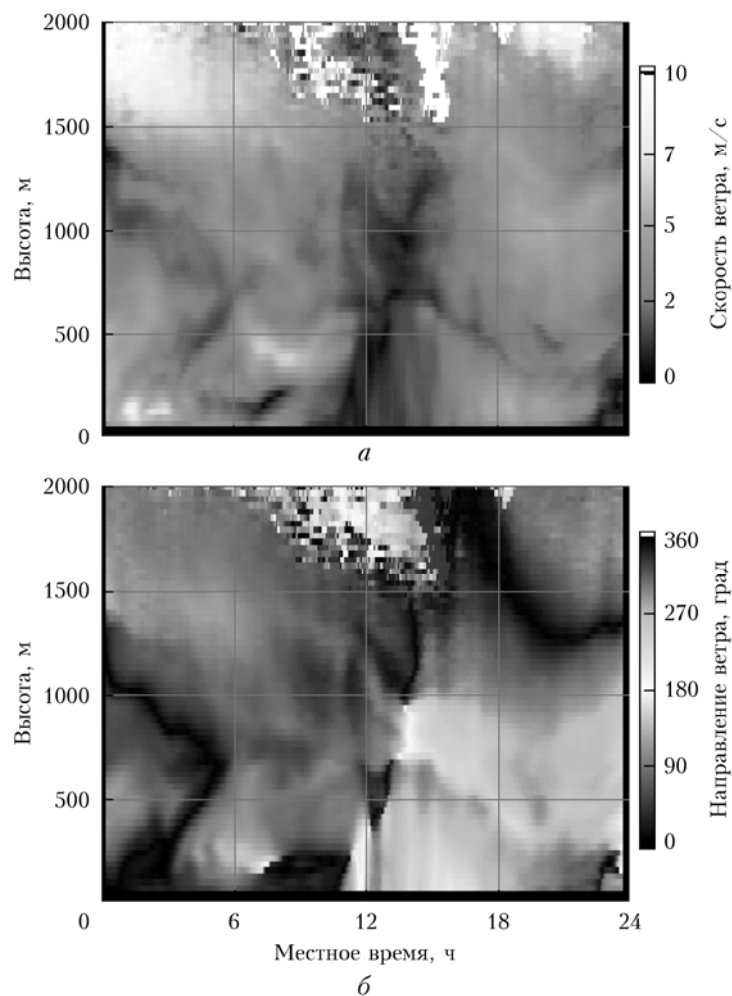


Рис. 5. Распределения скорости и направления ветра, полученные из данных рис. 4, в, е после применения процедуры, описываемой формулами (15) и (16)

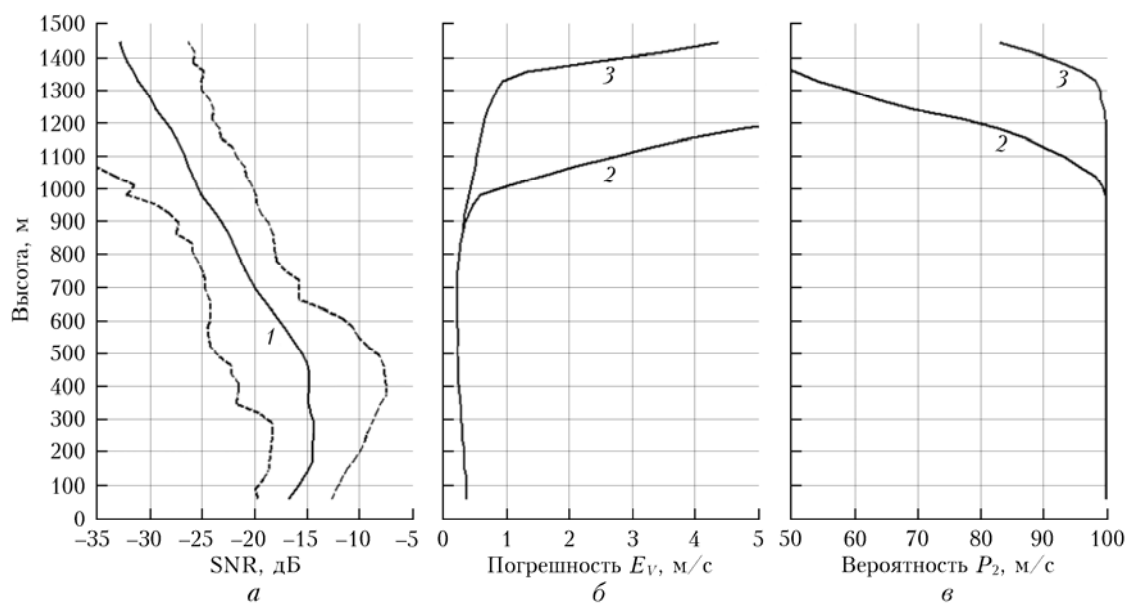


Рис. 6. Высотные профили SNR (а), E_V (б) и P_2 (в), полученные из измерений лидаром Windcube 200s в течение суток 17.10.2017 г.: 1 – среднегеометрическое значение от всех оценок SNR, штриховые кривые – максимальные и минимальные значения SNR; кривые 2 и 3 – относительные погрешности E_V и вероятности P_2 в случаях применения методов ФСП и МФАС соответственно

составляет 600 м (86%), по сравнению с ПСП, и 300 м (30%) с ФСП.

Заключение

Таким образом, в данной работе исследована эффективность метода МФАС для оценивания вектора скорости ветра из измерений МИКДЛ Windcube 200s в условиях слабого эхосигнала в сравнении с методами ПСП и ФСП. В численном эксперименте установлено, что метод МФАС позволяет получать приемлемый результат при SNR ниже границ применимости ФСП на 2,5 дБ и ПСП на 10 дБ. Анализ результатов натурального эксперимента показал, что максимальная высота восстановления высотных профилей скорости и направления ветра методами ПСП, ФСП и МФАС в среднем составляет 700; 1000 и 1300 м соответственно.

Недостатком метода МФАС является то, что требуется значительно большее время для его реализации на компьютере по сравнению с ПСП и ФСП. Однако путем комбинации этих трех методов (например, для условий рассмотренного выше натурального эксперимента можно использовать ПСП при $\overline{SNR} \geq -18$ дБ, ФСП при -18 дБ $> \overline{SNR} \geq -24$ дБ и МФАС при -33 дБ $\leq \overline{SNR} < -24$ дБ) удается со-

кратить продолжительность восстановления высотных профилей скорости и направления ветра почти на порядок и получать информацию о ветре в режиме реального времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-42-700072).

1. *Lhermitte R.M., Atlas D.* Precipitation motion by pulse Doppler // Proc. 9th Weather Radar Conf. 1961. Kansas City, MO, USA. P. 218–223.
2. *Doviak R.J., Zrnic D.S.* Doppler radar and weather observations. San Diego: Academic Press, 1984. 458 p.
3. *Smalikho I.N.* Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent Doppler lidar // J. Atmos. Ocean. Technol. 2003. V. 20, N 2. P. 276–291.
4. *Vasiljevic N., Lea G., Courtney M., Cariou J.P., Mann J., Mikkelsen T.* Long-range windscanner system // Remote Sens. 2016. V. 8, N 11. P. 896. DOI: 10.3390/rs8110896.
5. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 304 с.
6. *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.
7. *Frehlich R.G.* Effect of wind turbulence on coherent Doppler lidar performance // J. Atmos. Ocean. Technol. 1997. V. 14, N 2. P. 54–75.

A. Stephan, N. Wildmann, I.N. Smalikho. Effectiveness of the MFAS method for determination of wind velocity from Windcube 200s lidar measurements.

The method of maximum of function of accumulated spectra (MFAS) has been used for the first time to estimate the wind velocity from measurements with a micropulsed coherent Doppler lidar (MPCDL) during conical scanning with a probing beam. It is ascertained in an experiment with a Windcube 200s MPCDL that MFAS allows an increase in the maximum altitude of retrieval of the vertical profiles of the wind speed and direction by 30% on the average in comparison with the filtered sine-wave fitting.