

УДК 551.511.6:621.371

Определение отношения сигнал/шум из исходных данных, измеряемых импульсным когерентным доплеровским лидаром в условиях нестационарного шума

И.Н. Смалихо✉, В.А. Банах, А.М. Шерстобитов*

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

Поступила в редакцию 04.09.2023;
после доработки 09.10.2023;
принята к печати 11.10.2023

Ключевым фактором, определяющим точность измерения скорости ветра импульсным когерентным доплеровским лидаром (ИКДЛ), является отношение сигнал/шум (SNR). Поэтому информация об SNR важна для интерпретации результатов измерения. Однако известные подходы к определению SNR из исходных данных, измеряемых ИКДЛ, не применимы в случае лидара, созданного в Лаборатории распространения волн ИОА СО РАН (ЛРВ), из-за существенной нестационарности шумовой составляющей регистрируемого им сигнала. В настоящей работе разработан новый метод, который учитывает нестационарность шума. Метод протестирован в эксперименте с ИКДЛ Stream Line и ЛРВ. Путем сопоставления оценок SNR из совместных измерений этими лидарами доказана практическая применимость предложенного метода.

Ключевые слова: когерентный доплеровский лидар, отношение сигнал/шум, нестационарность шума, радиальная скорость; coherent Doppler lidar, signal-to-noise ratio non-stationary noise, radial velocity.

Введение

При интерпретации данных, измеряемых лидаром, важным фактором, указывающим на их репрезентативность, является отношение сигнал/шум (SNR). В случае импульсного когерентного доплеровского лидара (ИКДЛ) отношение сигнал/шум, как правило, определяется как отношение средней мощности когерентно детектируемого эхосигнала к средней мощности шума в определенной частотной полосе пропускания (например, 50 МГц) [1, 2]. В зависимости от типа ИКДЛ и свойств шума известен ряд способов определения SNR из исходных лидарных данных [2].

В последнее время широкое распространение получили оптоволоконные ИКДЛ [3–7], к которым относятся, например, Windcube 200s (Leosphere, Франция) [7] и Stream Line (HALO Photonics, Великобритания) [4]. Исходными данными измерений этих лидаров являются оценки, соответственно, спектров мощности и корреляционных функций комплексного лидарного сигнала, которые включают в себя полезную (эхосигнал) и шумовую составляющие. Два фактора: 1) падение средней мощности эхосигнала до пренебрежимо малых значений на больших расстояниях от лидара, 2) неизменность

во времени (между посылками зондирующего импульса) средней мощности шума, — позволяют легко оценить SNR из исходных данных этих лидаров [8, 9].

Однако для некоторых оптоволоконных ИКДЛ характерной особенностью является нестационарность шума, заключающаяся в том, что средняя мощность шума между посылками зондирующего импульса со временем растет. Одним из примеров таких ИКДЛ является лидар, созданный в Лаборатории распространения волн ИОА СО РАН (далее лидар ЛРВ) [10, 11]. Для него применение описанного в [8] метода возможно лишь при $\text{SNR} \geq 0,1$ (–10 дБ), хотя приемлемая (несмещенная) оценка радиальной скорости ветра из измеряемого доплеровского спектра возможна при значительно меньших величинах SNR. Поэтому для лидаров ЛРВ требовался новый метод определения SNR, учитывающий нестационарность шума.

Цель настоящей работы — разработка такого метода и его тестирование в экспериментах, в которых одновременно задействованы лидары ЛРВ и Stream Line.

Метод определения SNR из измерений лидаром ЛРВ

Основные параметры лидара ЛРВ следующие [11]: длина волны зондирующего излучения

* Игорь Николаевич Смалихо (smalikho@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Артем Михайлович Шерстобитов (shrgarm@iao.ru).

$\lambda = 1,55$ мкм; диаметр телескопа $D = 5$ см; зондирующий пучок коллимирован ($F = \infty$); частота следования импульсов $f_p = 10$ кГц; длительность импульса τ_p может задаваться от 100 до 1000 нс (в большинстве наших экспериментов $\tau_p = 200$ нс); энергия в импульсе $E = 10$ мкДж (при длительности импульса 200 нс); частотная полоса пропускания АЦП $B_0 = 250$ МГц (временной интервал дискретизации регистрируемого лидарного сигнала $\delta t = 1/B_0 = 4$ нс и расстояние между отсчетами реального лидарного сигнала $\delta z = c\delta t/2 = 0,6$ м, c — скорость света, t — время); промежуточная частота (разность частот зондирующего и опорного излучения) $f_{\text{int}} = 80$ МГц.

Обозначим через $Z(m\delta t; n')$ массив отсчетов сигнала, регистрируемых приемной системой лидара ЛРВ, где $m\delta t < 1/f_p$ — время, отсчитываемое с момента вылета зондирующего импульса в атмосферу, $m = 1, 2, 3, \dots$ — номер отсчета; $n' = 1, 2, 3, \dots$ — номер посылки импульса в атмосферу. В лидарном зондировании (моностатическая схема локации) время $t_m = m\delta t$ соответствует расстоянию $R = ct_m/2 = m\delta z$ от лидара до центра зондируемого объема, из которого пришло рассеянное назад лазерное излучение. Воспользовавшись временным окном шириной $T_W = 256$ нс ($M = T_W/\delta t = 64$ отсчета сигнала), быстрым преобразованием Фурье и спектральной аккумуляцией по N_a посылкам импульса в атмосферу, для $K = 390$ расстояний от лидара $R_k = R_0 + k\Delta R$, где $k = 0, 1, 2, \dots, K-1$ — номер расстояния (вдоль оптической оси) и $\Delta R = 9,6$ м — шаг по дальности, получаем массив оценок спектров мощности лидарного сигнала (доплеровских спектров) $\hat{S}(f_i; R_k)$ согласно формуле

$$\hat{S}(f_i; R_k) = \frac{1}{N_a} \sum_{n'=1}^{N_a} \left| \sum_{m=0}^{M-1} Z(2R_k/c + (m - M/2)\delta t; n') \exp\{-2\pi j m i / M\} \right|^2, \quad (1)$$

где $f_i = i\Delta f$ — частота, $i = 0, 1, 2, \dots, M/2$ — номер спектрального канала (всего 32 канала), $\Delta f = 1/(M\delta t) = B_0/M \approx 3,9$ МГц — ширина спектрального канала; $M = 64$ и $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица. Таким образом, частота f_i принадлежит интервалу от 0 до 125 МГц. В измерениях лидаром ЛРВ мы всегда задавали число $N_a = 10000$. С учетом того, что $f_p = 10$ кГц, продолжительность измерения одного массива доплеровских спектров, определяемых по формуле (1), $\Delta t = N_a/f_p = 1$ с.

В случае лидаров наземного базирования во время измерения скорости ветра вполне достаточной является частотная полоса пропускания шириной $B = 50$ МГц. При этом желательно, чтобы промежуточная частота f_{int} была в самом центре полосы пропускания. Для уменьшения ширины спектраль-

ного канала в 128 раз, с $\Delta f = 3,9$ МГц до $\delta f \approx 0,03$ МГц, можно воспользоваться Фурье-интерполяцией [8] и перейти от $\hat{S}(f_i; R_k)$ к спектру $\tilde{S}(f_i; R_k)$ в пределах полосы пропускания с $B = 50$ МГц, где частота f_i принадлежит интервалу от $f_{\text{int}} - B/2$ до $f_{\text{int}} + B/2$, с числом спектральных каналов $M' = [B/\delta f] = 1667$ и шириной одного спектрального канала 0,03 МГц. Просуммировав $\tilde{S}(f_i; R_k)$ по всем M' , для различных расстояний от лидара R_k получаем оценки мощности лидарного сигнала (в относительных единицах):

$$\hat{P}(R_k) = \sum_{M'} \tilde{S}(f_i; R_k). \quad (2)$$

С учетом статистической независимости эхосигнала и шума средняя (по ансамблю реализаций) величина $\langle \hat{P}(R_k) \rangle = P(R_k)$ представляет собой сумму средней мощности эхосигнала $P_S(R_k)$ и средней мощности шума $P_N(R_k)$:

$$P(R_k) = P_S(R_k) + P_N(R_k). \quad (3)$$

С увеличением расстояния от лидара мощность эхосигнала $P_S(R_k)$ падает (в разы или на порядки), в то время как мощность шума $P_N(R_k)$ изменяется незначительно (например, в случае лидара ЛРВ при увеличении R_k с 300 до 3300 м $P_N(R_k)$ возрастает на 5–7%). Следовательно, отношение сигнал/шум, определяемое как

$$\text{SNR} = P_S/P_N, \quad (4)$$

также будет падать с ростом R_k . Если бы мощность шума не зависела от R_k (вернее, от $m\delta t$), как в случае с лидаром Windcube 200s [8], или изменялась бы с расстоянием на не более чем десятую долю процента, как в случае со Stream Line [9], тогда, воспользовавшись полученными значениями $\hat{P}(R_k)$ для больших расстояний $R_k \in [R_{k_1}, R_{k_1 + K_1 - 1}]$, где гарантированно $P_N(R_k) > P_S(R_k)$ как минимум на три порядка, т.е. $\hat{P}(R_k) \approx \hat{P}_N(R_k)$ ($\hat{P}_N$ — оценка мощности шума), можно получить оценку средней мощности шума в виде

$$\bar{P}_N = (1/K_1) \sum_{k=k_1}^{k_1 + K_1 - 1} \hat{P}(R_k). \quad (5)$$

Затем в соответствии с (3) и (4) оценка SNR определяется как

$$\text{SNR}(R_k) = \hat{P}(R_k) / \bar{P}_N - 1. \quad (6)$$

Особенностью ИКДЛ Stream Line с $E = 14$ мкДж, $\lambda = 1,5$ мкм, диаметром телескопа $D = 7,5$ см [11] и коллимированным зондирующим пучком является то, что для обычных условий (фоновый аэрозоль) даже в нижней части пограничного слоя атмосферы (до 300–500 м) SNR, как правило,

не превышает -15 дБ ($0,03$). Энергия импульса ли-
дара ЛРВ сопоставима (10 мкДж), но в отличие от
ИКДЛ Stream Line для него имеет место регулярная
зависимость мощности шума R_N от расстояния R_k
($m\delta t$), поэтому не представляется возможным ис-
пользовать простейший алгоритм, описываемый
формулами (5) и (6), для получения SNR.

Для восстановления профилей $P_N(R_k)$ мы про-
вели эксперимент с лидаром ЛРВ, работающим при
закрытом телескопе. На рис. 1 приведен пример
измеренной мощности $\hat{P}(R_k)$ сигнала, регистрируе-
мого приемной системой лидара ЛРВ при закрытом
телескопе, т.е. когда отсутствует рассеяние зонди-
рующего излучения в атмосфере, в зависимости от
номера доплеровского спектра $k = 0, 1, 2, \dots, K$
($K = 390$), расстояния $R_k = R_0 + k\Delta R$ ($R_0 = -50$ м
и $\Delta R = 9,6$ м) и времени $kt_p = 2R_k/c$. Полученный
профиль $\hat{P}(R_k)$ включает в себя мощность сигнала
рассеяния зондирующего импульса на оптических
элементах внутри лидара (график слева). При $k \geq 15$
этот фактор отсутствует (таким образом, мертвая
зона, т.е. минимальная дальность измерения, ли-
дара ЛРВ составляет $15 \times 9,6$ м $- 50$ м $= 94$ м) и свой
вклад в $\hat{P}(R_k)$ вносят только шумы (т.е.
 $\hat{P}(R_k) = \hat{P}_N(R_k)$, график справа). При этом с ростом
времени kt_p мощность шума $\hat{P}_N(R_k)$ возрастает, что
связано с увеличением интенсивности «просачи-
вающегося» через акустико-оптический модулятор
мизерного непрерывного излучения задающего ла-
зера (которое также отражается от оптических

элементов внутри лидара и создает дополнительный
шум).

Решить эту проблему (т.е. убрать «просачива-
ние») техническими средствами нам не удалось. По-
этому для определения SNR мы предложили сле-
дующий алгоритм. На рис. 1 видно, что при $k \geq 25$
($R_k \geq 190$ м) полученный профиль $\hat{P}_N(R_k)$ в среднем
можно аппроксимировать линейной зависимостью
(штриховая линия). Согласно теоретическим оцен-
кам при обычных условиях (фоновый аэрозоль,
отсутствие облаков на трассе зондирования) на рас-
стоянии $R_k > 1$ км мощность эхосигнала $P_S(R_k)$
как минимум на два порядка меньше мощности
шума $P_N(R_k)$. Поэтому из всего массива $\hat{P}(R_k)$ мы
выбираем подмассив с $k \geq 100$ и подгоняем к по-
следнему линейную зависимость от расстояния
средней мощности шума $\bar{P}_N(R_k) = a + bR_k$ методом
наименьших квадратов. Полученную после вычита-
ния из a среднеквадратического отклонения мощ-
ности шума зависимость $\bar{P}_N(R_k)$ применяем к диа-
пазону расстояний R_k ($25 \leq k \leq 389$). А для интер-
вала $15 \leq k \leq 24$ на основе полученной нами
эмпирической зависимости $\bar{P}_N(R_k)/\bar{P}_N(R_{25})$ осу-
ществляется учет «западания» шума на расстоянии от
94 до 190 м. Затем оценивается отношение сиг-
нал/шум как

$$SNR(R_k) = \hat{P}(R_k)/\bar{P}_N(R_k) - 1. \quad (7)$$

На рис. 2, а приведен пример мощности $\hat{P}(R_k)$
регистрируемого лидаром сигнала во время измере-
ния в атмосфере и средней мощности шума $\bar{P}_N(R_k)$,

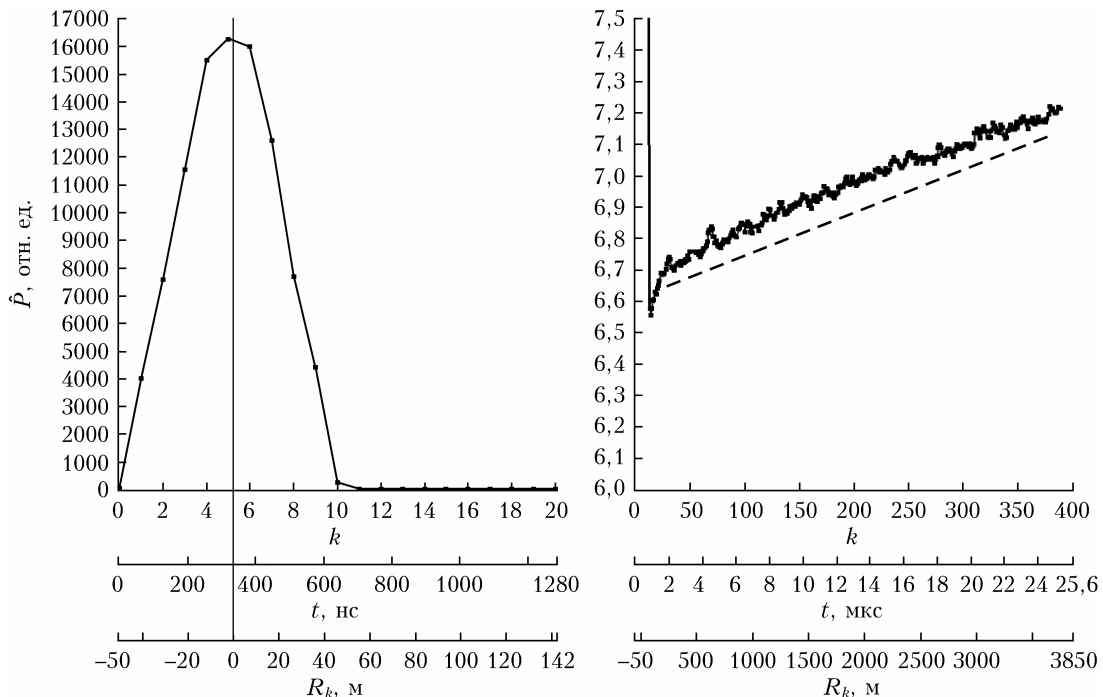


Рис. 1. Изменение мощности сигнала $\hat{P}$, регистрируемого приемной системой лидара ЛРВ при отсутствии рассеяния зон-
дирующего излучения на атмосферном аэрозоле, в зависимости от номера спектра $k = 0, 1, 2, \dots, K - 1$, времени $t = kt_p$
и расстояния R_k ($K = 390$, $t_p = 64$ нс, $R_0 = -50$ м, $\Delta R = 9,6$ м)

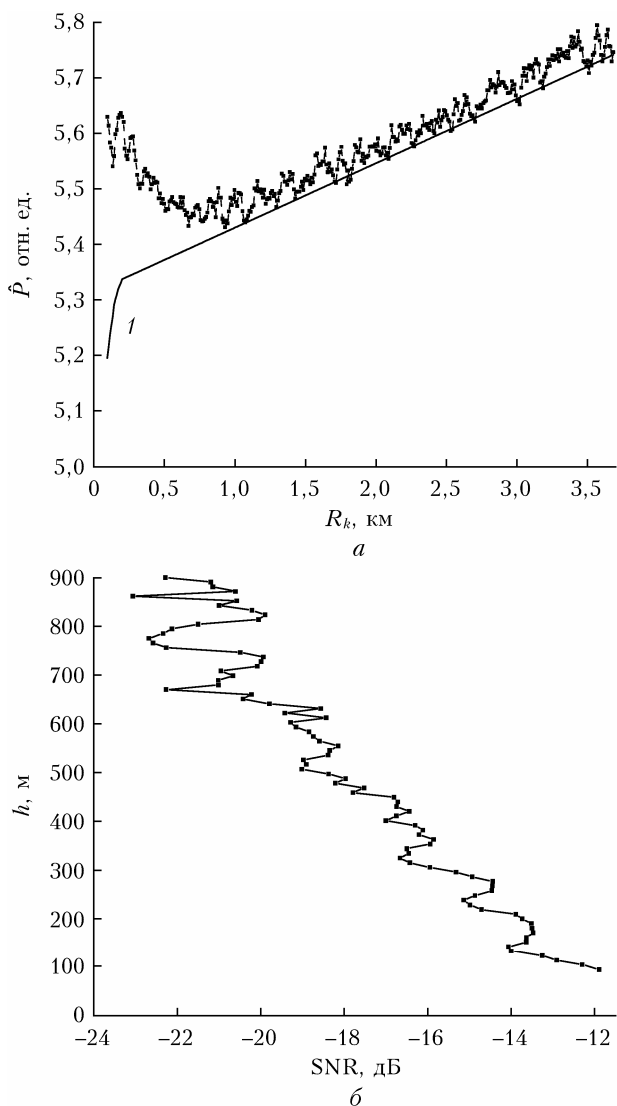


Рис. 2. Мощность лидарного сигнала в зависимости от расстояния, восстановленная из измерений лидаром ЛРВ в течение 1 с на БЭКе ИОА СО РАН 29.04.2022 г., и полученная из нее средняя мощность шума $\bar{P}_N(R_k)$ (кривая 1) (а); высотный профиль SNR, рассчитанный с использованием данных рис. 2, а и формулы (7) (б)

полученной с использованием описанной выше процедуры. По формуле (7) мы рассчитали SNR и с учетом того, что зондирующий пучок был направлен строго вертикально (высота $h_k = h_0 + k\Delta h$ совпадает с расстоянием от лидара $R_k = R'_0 + k\Delta R$, где $h_0 = R'_0 = 94$ м, $\Delta h = \Delta R = 9,6$ м и $k = 0, 1, 2, \dots, 84$), построили высотный профиль SNR (рис. 2, б).

Показанный на рис. 2, б профиль $\text{SNR}(h_k)$ не противоречит теоретическим оценкам для данного типа ИКДЛ. Тем не менее представляет интерес сопоставление значений SNR во время совместных измерений лидарами ЛРВ и Stream Line, что и будет сделано ниже. Следует отметить один важный момент. Приведенные на рис. 2, а данные получены

из измерений в безоблачную погоду. Однако если на расстоянии R_k от лидара, которое попадает в интервал между 1 и 3,8 км, будет находиться облако, из-за чего существенная часть зондирующего излучения будет отражаться назад, то предлагаемый способ определения SNR не сработает. Для решения этой проблемы мы усовершенствовали алгоритм подгонки $\bar{P}_N(R_k) = a + bR_k$ к $\hat{P}(R_k)$ (на отрезке между 1 и 3,8 км) методом наименьших квадратов путем задания (эмпирически) определенного порога P'_{Thr} и отбрасывания данных в подмассиве $\hat{P}(R_k)$, для которых $[\hat{P}(R_k) - \bar{P}_N(R_k)] / \bar{P}_N(R_k) > P'_{\text{Thr}}$. При этом используется итерационная процедура.

Тестирование метода в эксперименте с лидарами ЛРВ и Stream Line

Для тестирования изложенного выше метода определения SNR мы воспользовались данными измерений лидарами Stream Line и ЛРВ в апреле и мае 2022 г. в условиях довольно высокой концентрации аэрозольных частиц в атмосфере (относительно больших значениях коэффициента аэрозольного обратного рассеяния), что гарантирует достаточно высокое SNR для получения его оценок с высокой точностью (в случае обоих лидаров) во всем пограничном слое атмосферы (на высотах до 1 км). Эти эксперименты проводились на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН и в томском Академгородке при различных геометриях измерения лидарами и расстояниях между ними. Для сопоставления SNR из измерений лидарами Stream Line и ЛРВ были использованы интерполяция данных по высоте и усреднение одиночных оценок (время измерения одиночной оценки $\Delta t = 0,5$ с в случае лидара Stream Line и $\Delta t = 1$ с в случае ЛРВ-лидара) по времени в пределах интервала шириной $t_a = 10$ с.

Согласно теории (см., например, [12] или [2]) в ближней зоне дифракции зондирующего излучения $\text{SNR}_i \sim E_i \lambda_i^3 / D_i^2$, где индекс $i = 1$ указывает на лидар Stream Line, а $i = 2$ — лидар ЛРВ. В пренебрежении различиями в энергетических потерях и коэффициентах аэрозольного рассеяния для лидаров ЛРВ и Stream Line и с учетом приведенных выше их параметров мы имеем грубую оценку отношения $\text{SNR}_2 / \text{SNR}_1 \approx 1,6$ (2 дБ), т.е. в ближней зоне дифракции SNR для лидара ЛРВ больше, чем для лидара Stream Line. Однако, как показали проведенные нами численные расчеты, в дальней зоне дифракции зондирующего излучения (на больших расстояниях от лидара), наоборот, $\text{SNR}_1 > \text{SNR}_2$.

На рис. 3 приведен пример распределений SNR по высоте $h_k = h_0 + k\Delta h$, где $h_0 = 100$ м, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ и $\Delta h = 10$ м, и времени $t_n = t_0 + nt_a$, где t_0 — начальное время (13:00 29.04.2022 г.)

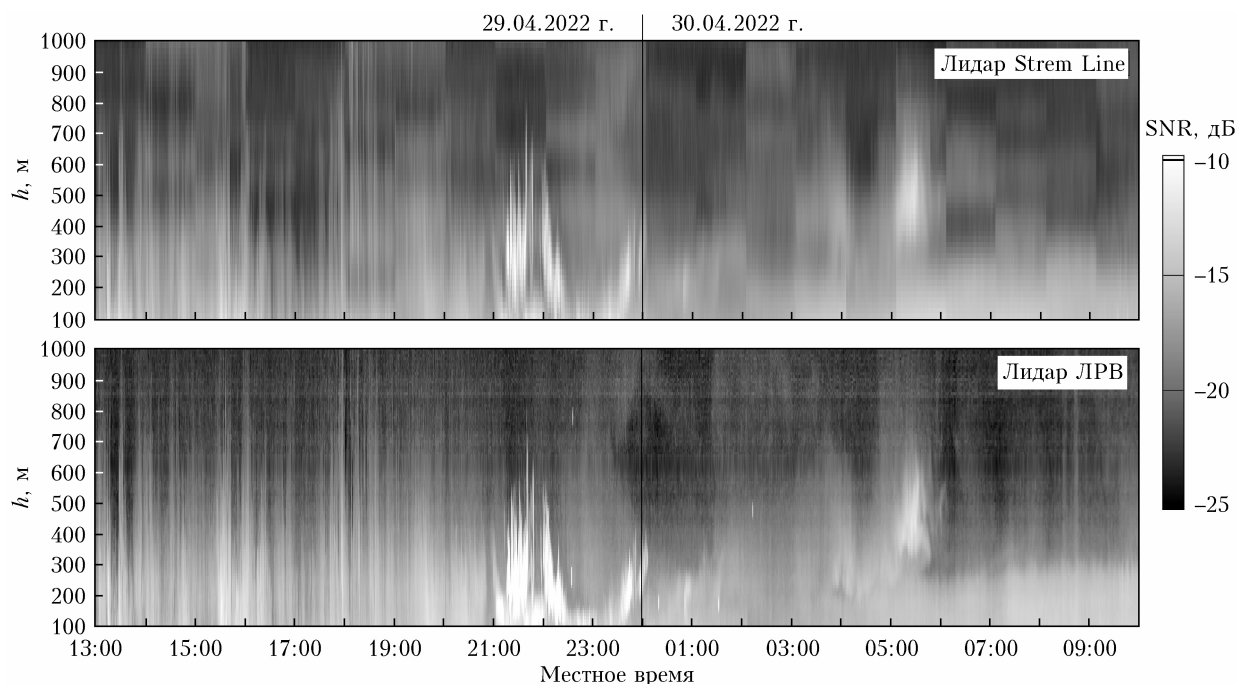


Рис. 3. Распределения SNR по высоте и времени, полученные из измерений лидарами Stream Line и ЛРВ, разнесенными на 2,5 м, с 13:00 29.04.2022 г. по 10:00 30.04.2022 г.

и $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, полученных из измерений лидарами Stream Line и ЛРВ, которые расположены на расстоянии 2,5 м друг от друга. Во время этих измерений оба зондирующих пучка были коллимированы и направлены вертикально. Визуально сопоставляя двумерные распределения SNR для двух лидаров, нетрудно заметить их довольно высокую корреляцию. В частности, в промежутке времени

между 21:00 и 22:30 в атмосферном слое до 500 м у обоих лидаров имеет место существенный всплеск уровня сигнала.

Для большей наглядности результатов на основе данных рис. 3 мы построили временные вариации SNR на высотах 100, 300 и 500 м (рис. 4). Интересно отметить, что SNR в измерениях этими лидарами довольно близки (по крайней мере,

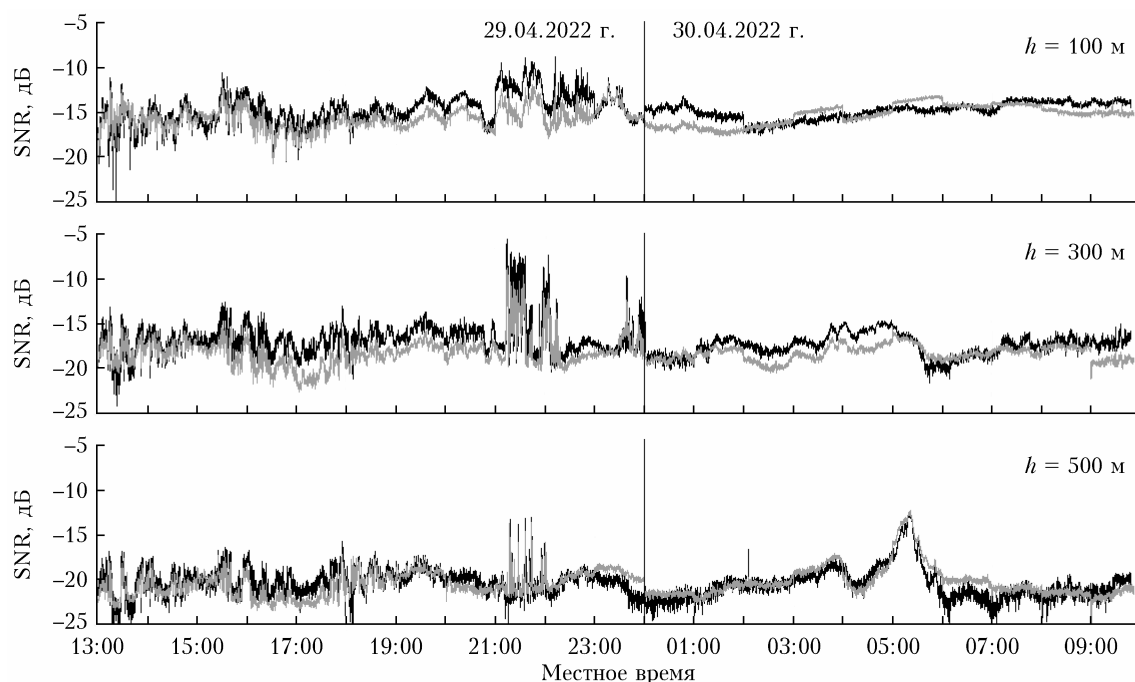


Рис. 4. Временные ходы SNR для лидаров Stream Line (серые кривые) и ЛРВ (черные кривые) на различных высотах на основе данных рис. 3

в атмосферном слое до 500 м) и временные вариации $SNR(t_n)$ большую часть времени качественно хорошо согласуются.

Чтобы сравнить количественно высотные профили SNR для лидаров Stream Line и ЛРВ, мы усреднили по времени (21 ч) все данные отдельно для верхнего и нижнего распределений на рис. 3 на каждой высоте, т.е. по 7560 одиночных (10-секундных) высотных профилей (рис. 5). Согласно рис. 5, в атмосферном слое 100–300 м отношение SNR_2/SNR_1 варьируется от 1 до 1,8 дБ и является относительно близким к приведенной выше теоретической оценке 2 дБ. На высотах, превышающих 500 м, $SNR_1 > SNR_2$, что согласуется с нашими теоретическими расчетами.

Так же как и на рис. 3–5, где представлены для сравнения результаты измерений SNR лидарами Stream Line и ЛРВ, расположенными друг от друга на расстоянии 2,5 м, на рис. 6–8 приведены аналогичные пространственно-временные распределения SNR для случаев, когда расстояние между лидарами было 3200 м. На рис. 6–8 также нетрудно заметить хорошую корреляцию SNR , полученных из измерений лидарами Stream Line и ЛРВ, несмотря на столь большое расстояние между ними. Согласно рис. 8 ниже ~ 500 м $SNR_1 < SNR_2$, а выше этого уровня $SNR_1 > SNR_2$.

Чем ниже SNR , тем больше погрешность оценки радиальной скорости ветра из измеряемого лидаром доплеровского спектра. Существует пороговое значение SNR , ниже которого не представляются

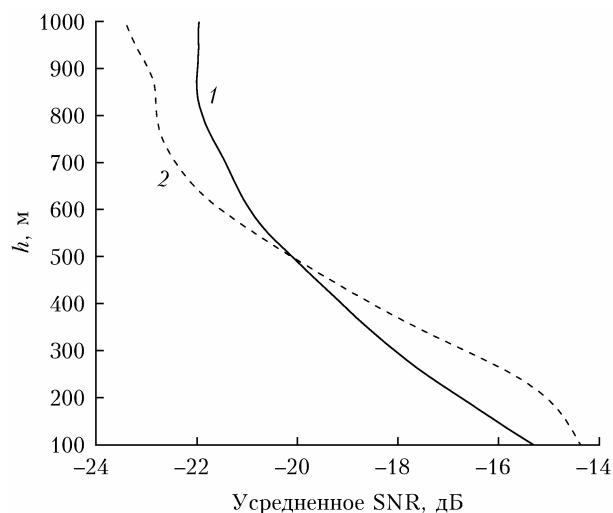


Рис. 5. Высотные профили усредненных (за 21 ч) SNR для лидаров Stream Line (кривая 1) и ЛРВ (кривая 2) (по данным рис. 3)

возможными лидарные измерения скорости ветра и тем более ветровой турбулентности, для которой такой порог еще больше. Бывает, что в атмосфере сильно падает концентрация аэрозольных частиц, особенно после долгих дождей, и из-за этого SNR может стать ниже порогового значения. Чтобы решить данную проблему, во время работы ИКДЛ используют фокусировку зондирующего пучка на определенное расстояние F от лидара в атмосфере. Например, при работе с лидаром Stream Line мы часто задаем $F = 300$ м. Это позволяет увеличить

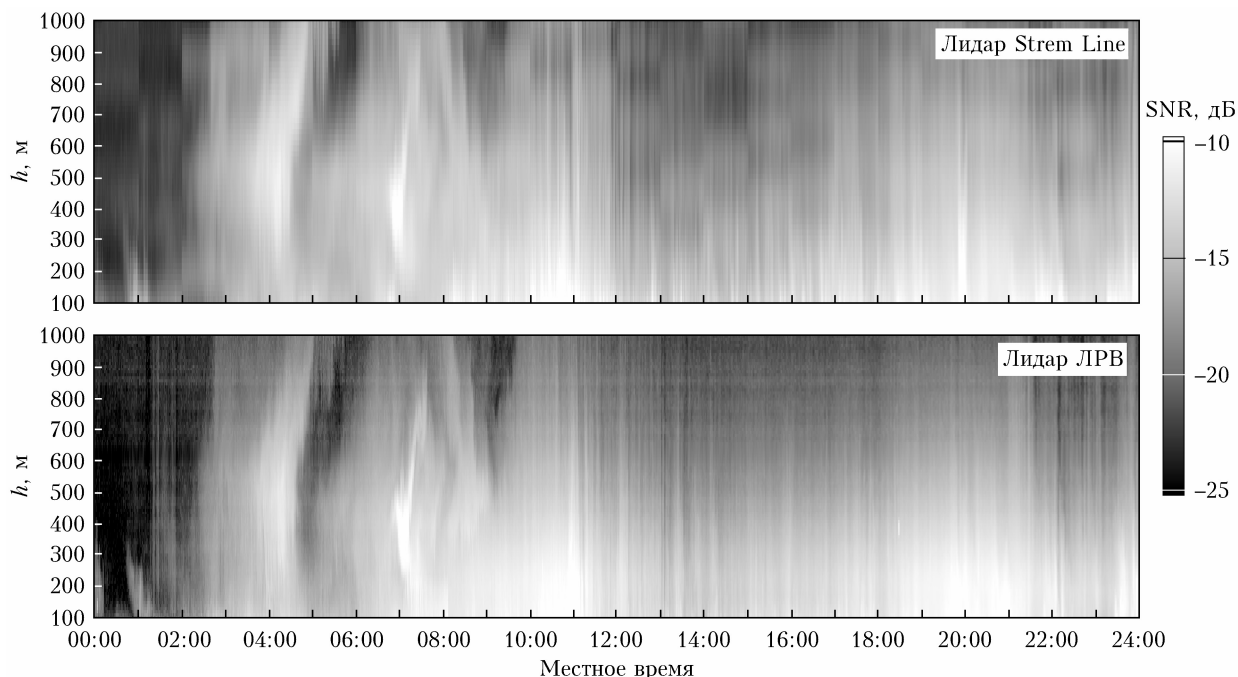


Рис. 6. Распределения SNR по высоте и времени для лидаров Stream Line и ЛРВ, разнесенных на 3200 м, в течение полных суток 20.05.2022 г.

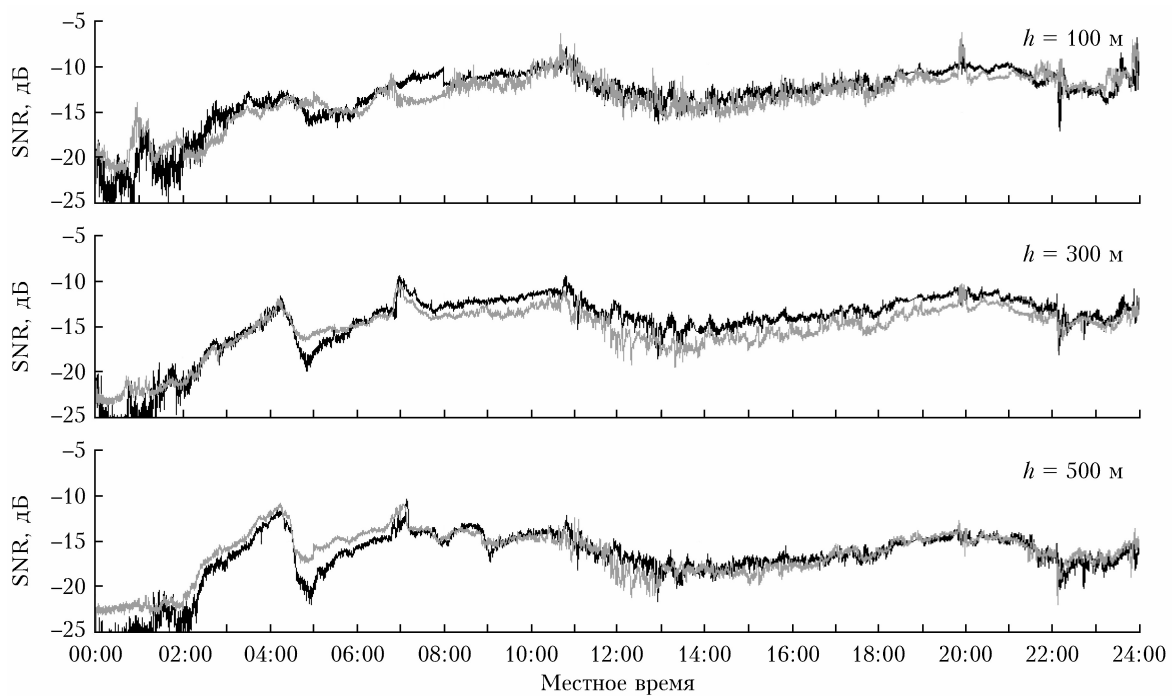


Рис. 7. Временные вариации SNR для лидаров Stream Line (серые кривые) и ЛРВ (черные кривые) на различных высотах (по данным рис. 6)

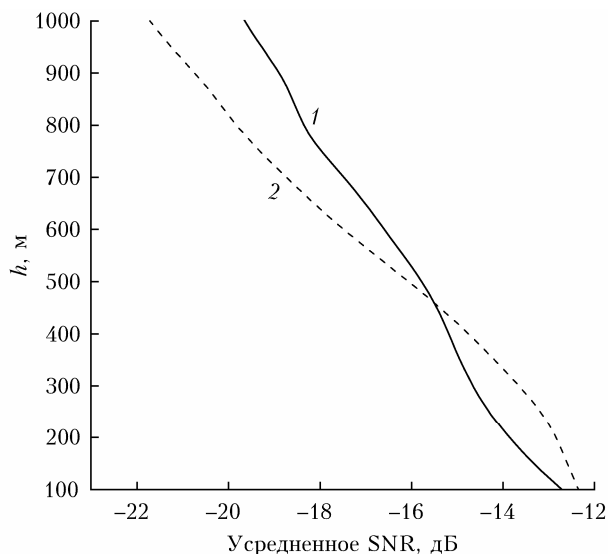


Рис. 8. Высотные профили усредненных (за полные сутки) SNR для лидаров Stream Line (кривая 1) и ЛРВ (кривая 2) (по данным рис. 6)

SNR для обратного рассеяния из области перетяжки зондирующего пучка примерно на порядок (на 10 дБ). Фокусировка пучка дает увеличение SNR до расстояния от лидара ~ 600 м. На расстоянии > 600 м SNR ниже, чем в случае коллимированного зондирующего пучка.

В выполненных нами в 2022 г. измерениях лидаром Stream Line при коническом зондировании всегда использовалась фокусировка зондирующего

пучка на 300 м. У лидара ЛРВ опция фокусировки излучения отсутствовала, т.е. во время измерений зондирующий пучок всегда был коллимирован. На рис. 9 приведен пример распределений SNR по высоте и времени, полученных из измерений лидарами Stream Line и ЛРВ, установленными на расстоянии 2,5 м друг от друга, при коническом сканировании зондирующими пучками при углах места 60° . Из-за фокусировки лидаром Stream Line здесь мы видим более существенное различие в распределениях SNR, чем на рис. 3 и 6.

Воспользовавшись данными рис. 9, мы построили временные вариации $\text{SNR}(t_n)$ с шагом по времени 1 мин (продолжительность одного конического сканирования) на высотах 100, 300, 500 и 700 м (рис. 10). Видно, что во всех вариантах SNR выше у лидара Stream Line, чем у лидара ЛРВ, что объясняется фокусировкой зондирующего излучения лидара Stream Line.

Согласно рис. 9 и 10 во время этих измерений имели место существенные изменения уровня эхосигнала. Поэтому, чтобы построить высотные профили усредненного SNR на основе данных рис. 9, мы разбили время измерения на четыре отрезка: 1) 10:00–16:00 и 2) 16:00–22:00 06.05, 3) с 22:00 06.05 по 04:00 07.05 и 4) 04:00–10:00 07.05.2022 г. Для каждой высоты измерения мы усреднили полученные оценки SNR по времени в пределах указанных выше отрезков. В итоге для каждого лидара мы получили по четыре высотных профиля усредненного SNR (рис. 11).

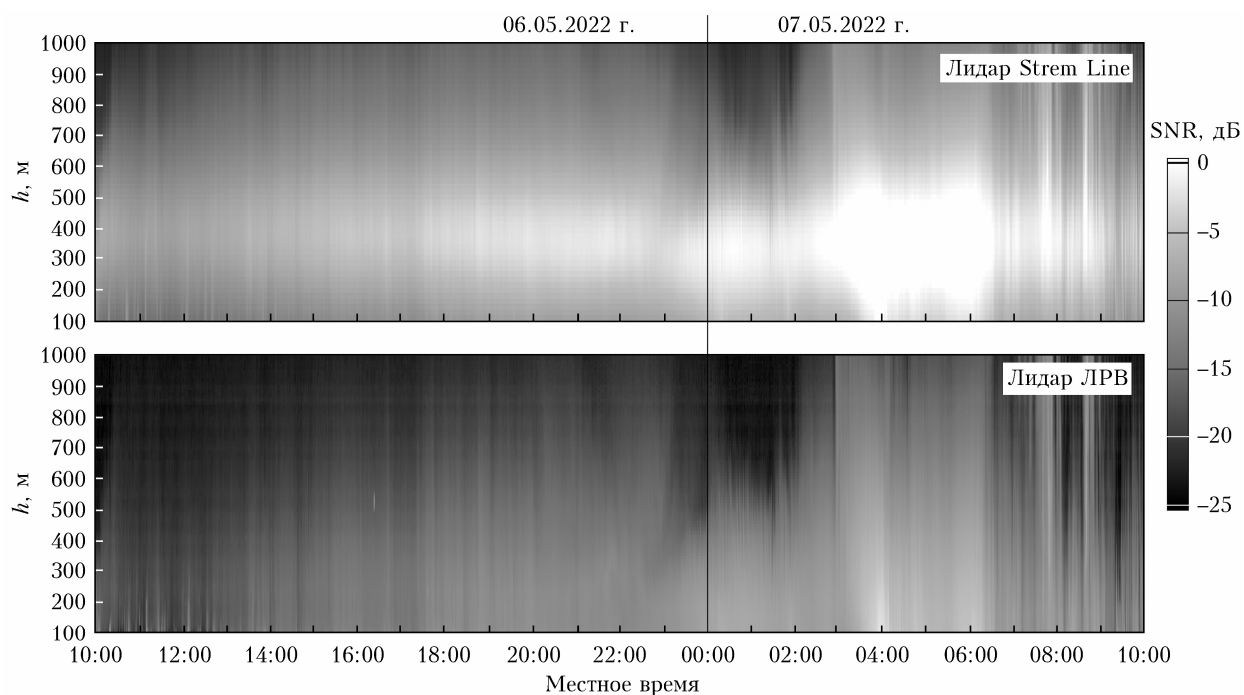


Рис. 9. Распределения SNR по высоте и времени для лидаров Stream Line и ЛРВ, разнесенных на 2,5 м, с 10:00 06.05.2022 г. до 10:00 07.05.2022 г.

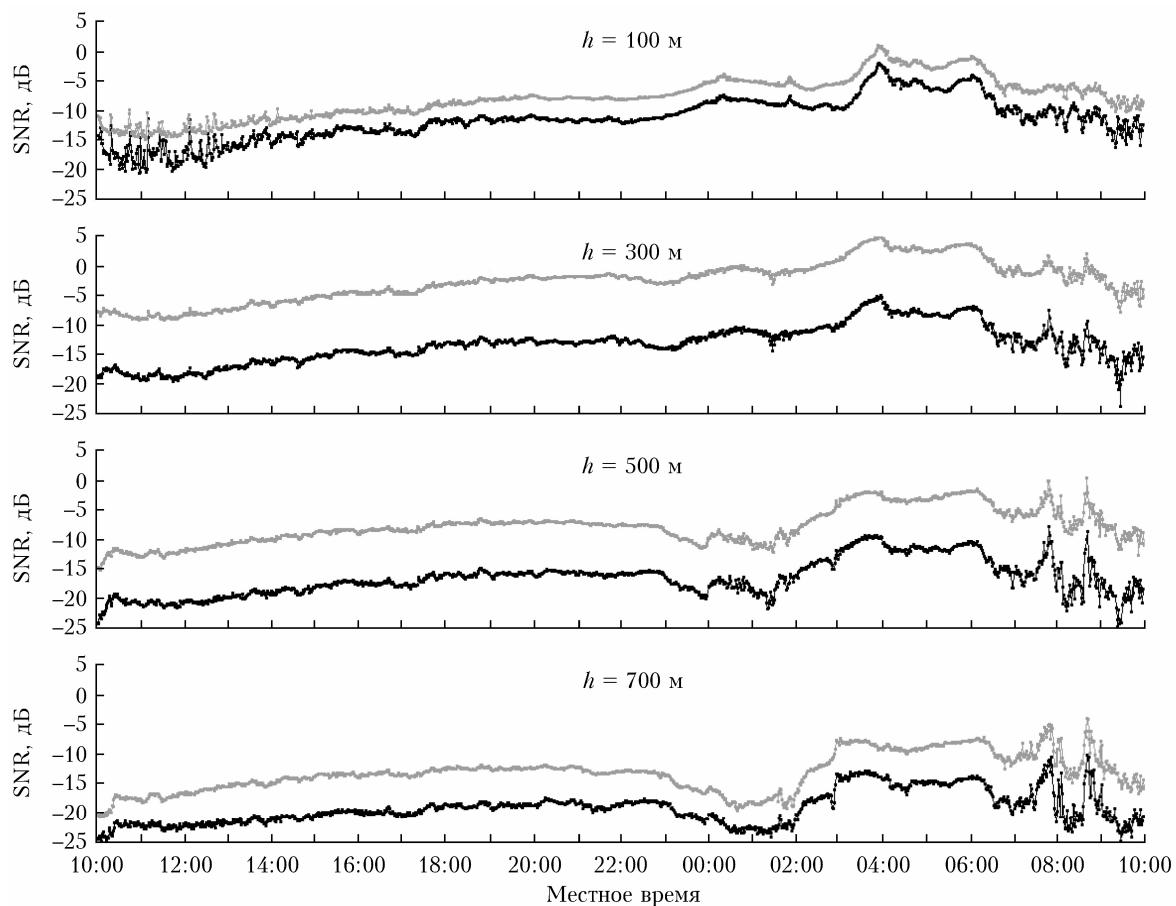


Рис. 10. Временные вариации SNR для лидаров Stream Line (серые кривые) и ЛРВ (черные кривые) на различных высотах (по данным рис. 9)

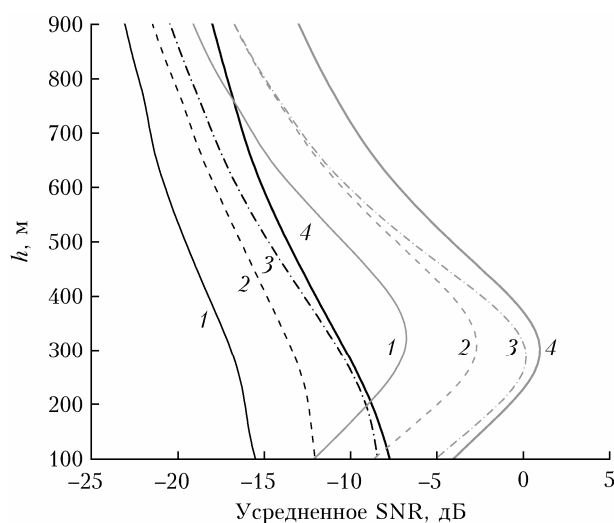


Рис. 11. Высотные профили усредненного (за 6 ч) SNR по измерениям лидарами Stream Line (серые кривые) и ЛРВ (черные кривые), построенные на основе данных рис. 9, усредненных по интервалам времени 10:00–16:00 (кривые 1) и 16:00–22:00 (кривые 2) 6 мая, с 22:00 6 мая по 04:00 7 мая (кривые 3) и 04:00–10:00 7 мая 2022 г. (кривые 4)

Как видно из рис. 11, серые кривые имеют максимум на высоте ~ 300 м, что связано с фокусировкой зондирующего пучка лидара Stream Line, в то время как для лидара ЛРВ (у которого зондирующий пучок был коллимирован) имеет место монотонное уменьшение SNR с высотой. При этом в атмосферном слое 100–900 м превышение SNR во время измерения лидаром Stream Line по сравнению с лидаром ЛРВ составляет от 3,3 дБ (в 2 раза) до 11,7 дБ (в 15 раз).

Заключение

Таким образом, разработанный нами метод позволяет определять отношение сигнал/шум из измерений оптоволоконным ИКДЛ в условиях нестационарности шума, обусловленной «просачиванием» непрерывного излучения задающего лазера через акустооптический модулятор в промежутках времени между посылками зондирующих импульсов в атмосферу. Метод протестирован на исходных данных совместных измерений лидарами Stream Line и ЛРВ (именно в случае лидара ЛРВ шум является нестационарным). Установлено, что если у этих лидаров зондирующие пучки коллимированы, то на вертикальных трассах до высоты около 500 м отношение сигнал/шум больше для лидара ЛРВ. Выше 500 м отношение сигнал/шум, наоборот, больше для лидара Stream Line. При этом в ближней зоне дифракции (на коротких расстояниях от лидара) превышение отношения сигнал/шум для лидара ЛРВ по сравнению с лидаром Stream Line вполне соответствует теоретической оценке такого превышения (2 дБ). Это указывает на практическую применимость разработанного метода.

Фокусировка зондирующего пучка лидара Stream Line на расстояние 300 м дает превышение отношения сигнал/шум на порядок по сравнению с лидаром ЛРВ, использующим коллимированный зондирующий пучок.

Список литературы

1. *Frehlich R.G., Hannon S.M., Henderson S.W.* Performance of a 2- μ m coherent Doppler lidar for wind measurements // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1994. V. 11, N 6. P. 1517–1528.
2. *Банах В.А., Смалыхо И.Н.* Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 304 с.
3. *Kameyama S., Ando T., Asaka K., Hirano Y., Wadaka S.* Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing // *Appl. Opt.* 2007. V. 46, N 11. P. 1953–1962.
4. *Pierson G., Davies F., Collier C.* An analysis of performance of the UFAM pulsed Doppler lidar for the observing the boundary layer // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2009. V. 26, N 2. P. 240–250.
5. *Dolfi-Bouteyre A., Canat G., Valla M., Augere B., Besson C., Goulard D., Lombard L., Cariou J.P., Durécu A., Fleury D., Bricteux L., Brousmiche S.* Pulsed 1.5- μ m LIDAR for axial aircraft wake vortex detection based on high-brightness large-core fiber amplifier // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2009. V. 15. P. 441–450.
6. *Wu S., Liu B., Liu J., Zhai X., Feng C., Wang G., Zhang H., Yin J., Wang X., Li R., Gallacher D.* Wind turbine wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar // *Opt. Express.* 2016. V. 24, N 10. P. A762–80. DOI: 10.1364/OE.24.00A762.
7. *Vasiljevic N., Lea G., Courtney M., Cariou J.P., Mann J., Mikkelsen T.* Long-range WindScanner System // *Remote Sens.* 2016. V. 8. P. 896. DOI: 10.3390/rs8110896.
8. *Stephan A., Wildmann N., Смалыхо И.Н.* Эффективность метода МФАС для определения вектора скорости ветра из измерений лидаром Windcube 200s // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 9. С. 725–733; *Stephan A., Wildmann N., Smalikho I.N.* Effectiveness of the MFAS method for determining the wind velocity vector from Windcube 200s lidar measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 5. P. 555–563.
9. *Banakh V.A., Smalikho I.N.* Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of atmosphere on the coast of Lake Baikal // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9, N 10. P. 5239–5248. DOI: 10.5194/amt-9-5239-2016.
10. *Banakh V.A., Nadeev A.I., Razenkov I.A., Smalikho I.N., Falits A.V., Sherstobitov A.M.* Test results of a pulsed coherent Doppler lidar created at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS // *Proc. SPIE.* 2019. V. 11208. P. 112085K-1–9. DOI: 10.1117/12.2540944.
11. *Смалыхо И.Н., Банах В.А., Разенков И.А., Сухарев А.А., Фалиц А.В., Шерстобитов А.М.* Сравнение результатов совместных измерений скорости ветра когерентными доплеровскими лидарами Stream Line и ЛРВ // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 10. С. 826–835; *Smalikho I.N., Banakh V.A., Razenkov I.A., Sukharev A.A., Falits A.V., Sherstobitov A.M.* Comparison of results of joint wind velocity measurements

with the Stream Line and WPL coherent Doppler lidars
// Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N S1. P. S79–
S91. DOI: 10.1134/S1024856023010177.

12. *Frehlich R.G., Kavaya M.J.* Coherent laser radar performance for general atmospheric turbulence // Appl. Opt. 1991. V. 30. P. 5325–5337.

***I.N. Smalikho, V.A. Banakh, A.M. Sherstobitov.* Estimation of the signal-to-noise ratio from raw data measured by a pulsed coherent Doppler lidar under conditions of non-stationary noise.**

The key factor determining the accuracy of pulsed coherent Doppler lidar (PCDL) wind speed measurements is the signal-to-noise ratio (SNR). Therefore, SNR information is important for interpreting measurement results. However, the known approaches to determining SNR from raw data measured by PCDL are not applicable in the case of a PCDL lidar created at the Wave Propagation Laboratory of Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, (WPL PCDL lidar) due to significant non-stationarity of the noise component of recorded signals. In this work, a new technique for determining the signal-to-noise ratio from raw data measured by a pulsed Doppler lidar (PCDL) accounting the non-stationarity of noise is developed. The technique was tested in an experiment with a Stream Line PCDL and the WPL PCDL lidar. By comparing SNR estimates from joint measurements by these lidars, the practical applicability of the suggested technique is confirmed.