УДК 621.375

Анализ влияния оптического состояния атмосферы на дальность зондирования ветрового лидара

Белов М.Л.^{1,*}, Самсонова А.А.¹,
Иванов С.Е.¹, Городничев В.А.¹

* belov@bmstu.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проведено исследование влияния оптического состояния атмосферы на дальность зондирования ветрового корреляционного лидара и сравнение оценок дальности зондирования, полученных в рамках двух разных подходов к энергетическому расчету лидара. Показано, что подход, основанный на сравнении пороговой мощности приемника с принимаемой мощностью лазерного сигнала, дает завышенную оценку дальности зондирования за счет неполного учета всех влияющих факторов. В рамках другого подхода оценку дальности зондирования получают, приравнивая минимально обнаруживаемую энергию приемника к энергии регистрируемого лазерного сигнала. Показано, что в рамках этого подхода в широком диапазоне оптического состояния приземного слоя атмосферы (метеорологическая дальность видимости меняется от 20 до 2 км) дальность зондирования (при использовании ФЭУ в качестве фотодетектора) для лазерного источника на длине волны 0,532 мкм с ламповой накачкой и энергией в импульсе 5 Дж изменяется в диапазоне от ~ 3,8 км до ~ 1,2 км, а для лазерного источника с диодной накачкой и энергией в импульсе 90 мДж изменяется в диапазоне от ~ 1,1 км до ~ 0,64 км.

Ключевые слова: лазерный мониторинг, дальность зондирования ветрового лидара, влияния оптического состояния атмосферы

Введение

Методы лазерного зондирования являются одними из основных методов мониторинга атмосферы. Они позволяют получать массивы параметров земной атмосферы оперативно и с высоким пространственным и временным разрешением.

Ветровые лазерные локации (лидары) обеспечивают получение оперативной информации о скорости атмосферного ветра на основе измерения перемещений (под действием ветра) частиц атмосферного аэрозоля.

Лазерные методы зондирования атмосферного ветра можно разделить на доплеровские и времяпролётные (см., например, [1-8]). Более простыми (и, соответственно, тре-

бующими менее дорогую аппаратуру) являются времяпролётные (например, корреляционные) методы. Корреляционный лидар потенциально может оперативно измерять полный вектор скорости ветра и проводить измерения при сложном профиле скорости ветра без пространственного сканирования (см., например, [2,3,5,6,8]).

Одним из наиболее важных вопросов для ветровых лидаров (как и для лазерных локаторов, предназначенных для других задач) является вопрос о дальности зондирования.

Дальность зондирования корреляционного лидара существенно зависит не только от параметров передающего и приемного каналов лидара и характеристик шумов аппаратуры, но и от оптического состояния земной атмосферы.

На сегодняшний день существуют работы по энергетическому расчету корреляционных лидаров (см., например, [9,10]). Однако, вопрос о влиянии оптического состояния атмосферы на дальность зондирования ветрового лидара ранее не исследовался.

Кроме того, в настоящее время существуют два подхода к оценке дальности зондирования лидаров. В рамках одного подхода (см., например, [9,10]) оценку дальности зондирования получают, приравнявая пороговую мощность приемника к мощности лазерного сигнала, регистрируемого приемником. В рамках другого подхода (см., например, [11]) оценку дальности зондирования получают, приравнявая минимально обнаруживаемую энергию приемника к энергии регистрируемого лазерного сигнала. Причем, полученные в рамках этих двух подходов аналитические выражения существенно различаются.

Статья посвящена исследованию влияния оптического состояния атмосферы на дальность зондирования ветрового корреляционного лидара и сравнению оценок дальности зондирования, полученных в рамках двух подходов к энергетическому расчету лидара.

1. Мощность лазерного излучения рассеянного атмосферным аэрозолем

Лазерные методы зондирования атмосферного ветра основаны на регистрации лазерного сигнала рассеянного аэрозольными частицами назад (в сторону лидара). Расчет мощности такого сигнала в общем случае представляет сложную задачу. Однако, в случае прозрачной атмосферы выражение для мощности $P(z)$ принимаемого лазерного сигнала можно получить, используя приближение однократного рассеяния.

Для определенности положим длину волны зондирования равной 0,532 мкм (на этой длине волны зондирования поглощение оптического излучения атмосферными газами мало). Тогда, для мощности $P(z)$ имеем (см., например, [11-13]):

$$P(z) = P_o K_t K_r c \tau_u r_r^2 \sigma(z) \chi_\pi(z) T(z) G(z) / 8z^2, \quad (1)$$

где P_o – мощность излучения лидара; K_t , K_r – коэффициенты пропускания передающей и приемной оптики лидара; c – скорость света; τ_u – длительность импульса лидара; r_r – эффективный радиус приемной апертуры лидара; z – расстояние до текущего объема атмосферы, от которого в момент времени $t = \frac{2z}{c}$ приходит сигнал на приемник лидара; $\chi_\pi(z)$ – индикатриса рассеяния земной атмосферы для угла рассеяния, равного π (в направ-

лении «назад» на лидар); $\sigma(z)$, $\varepsilon(z)$ - показатели аэрозольного рассеяния и ослабления атмосферы на расстоянии z от лидара; $G(z)$ – геометрическая функция лидара;

$T^{1/2}(z) = \exp\left(-\int_0^z \varepsilon(x)dx\right)$ - коэффициент пропускания атмосферы на трассе «лидар - текущий объем атмосферы».

Для определенности будем считать, что схема зондирования однопозиционная (источник и приемник лидара совмещены в одном блоке) с совмещенными оптическими осями источника и приемника лидара. Тогда функция $G(L)$ имеет простой вид:

$$G(z) = \frac{\alpha_r^2}{\alpha_r^2 + \alpha_t^2},$$

где α_t, α_r - углы расходимости излучения передающего канала и поля зрения приемного канала лидара.

Для оценки энергии полезного сигнала (рассеянного атмосферой в сторону лидара), регистрируемого приемником лидара за время детектирования τ_d будем использовать соотношение:

$$E_s(z) = P_s(z)\tau_d, \quad (2)$$

где τ_d - время детектирования.

2. Пороговая мощность приемника

Для длины волны излучения 0,532 мкм наиболее эффективным фотодетектором является фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

Выражение для пороговой мощности ФЭУ P_{nop} при регистрации переменного сигнала на фоне солнечной засветки имеет вид (см., например [14,15]):

$$P_{nop} = \frac{\mu[2e(I_t + I_b)(1+B)\Delta f]^2}{S_k}, \quad (3)$$

где $(1+B) \cong 2.5$; μ - отношение сигнал/шум; $e=1.6 \cdot 10^{-19}$ [А·с] – заряд электрона; I_t , I_b – темновой ток фотокатода и ток, обусловленный фоновой (солнечной) засветкой; Δf – полоса частот ФПУ лидара; S_k – спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ.

Выражение для тока I_b , обусловленного фоновой (для ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазона - солнечной) засветкой в общем случае является очень сложным. Однако, для лидара с узкополосным спектральным фильтром и узким полем зрения приемной системы оно имеет простой вид (см., например [13]):

$$I_b = K_r L_b S_r (\pi \alpha_r^2) S_k \Delta \lambda, \quad (4)$$

где $S_r = \pi r_r^2$; L_b - спектральная яркость рассеянного в атмосфере фонового (солнечного) излучения; $\pi \alpha_r^2$ - телесный угол поля зрения приемной оптической системы; $\Delta\lambda$ - спектральная ширина узкополосного фильтра.

Аналитическое выражение для спектральной яркости L_b в настоящее время получено только для очень прозрачной земной атмосферы (вертикальная оптическая толщина всей атмосферы $\tau_o \leq 0,2$). Конкретный вид этого выражения зависит от схемы зондирования (зондирование в горизонтальном направлении, зондирование сверху вниз или снизу вверх). Для определенности будем считать, что зондирование происходит в приземном слое атмосферы в горизонтальном направлении. Тогда, для L_b имеем [13]:

$$L_b = 0,25\lambda_s S_\lambda \chi(\gamma) \frac{\cos \theta_o}{\cos \theta - \cos \theta_o} \left\{ \exp\left[-\frac{\tau_o}{\cos \theta}\right] - \exp\left[-\frac{\tau_o}{\cos \theta_o}\right] \right\}, \quad (5)$$

где $\cos \gamma = \cos \theta \cos \theta_o + \sin \theta \sin \theta_o \cos(\varphi - \varphi_o)$; $\lambda_s = \frac{\sigma}{\varepsilon}$; πS_λ - спектральная солнечная постоянная на длине волны лазерного зондирования; θ, φ и θ_o, φ_o - зенитные углы (по отношению к вертикали) и азимуты направления оптической оси приемника и Солнца, соответственно (при проведении расчетов для определенности полагали $\varphi = \varphi_o = 0$); $\chi(\gamma)$ - индикатриса рассеяния атмосферы; γ - угол рассеяния между направлением солнечного излучения и направлением оптической оси приемника.

В рамках другого подхода к энергетическому расчету лидара используют минимально обнаруживаемую энергию приемника.

Выражение для минимально обнаруживаемой энергии лазерного сигнала $E_{S \min}(\lambda)$ за время детектирования τ_d имеет (для рассматриваемого нами случая – приема рассеянного атмосферой лазерного сигнала) следующий вид [11] (как и в (3), пренебрегаем для рассматриваемого спектрального диапазона тепловым током):

$$E_{S \min}(\lambda) = \frac{1}{2} \mu^2 E(\lambda) \left[1 + \left\{ 1 + \frac{4}{\mu^2} \left[\frac{E_b^N(\lambda)}{E(\lambda)} + \frac{I_t}{2eB^*} \right] \right\}^{1/2} \right], \quad (6)$$

где $E(\lambda) = \frac{hcF_G}{\lambda \eta(\lambda) \xi_e}$; $B^* = \frac{BF_G}{\xi_e}$; $B = \frac{1}{2\tau_d}$;

$E_b^N(\lambda)$ - энергия фонового излучения, пришедшего на фотокатод за время детектирования τ_d ; $\eta(\lambda)$ - квантовый выход фотокатода на длине волны λ ; ξ_e - собирательная способность электростатической фокусировки ($\xi_e < 1$); F_G - параметр усиления шума ($F_G : 1...2,5$).

При работе лидара в дневное время наибольший вклад в минимально обнаруживаемую энергию $E_{S \min}(\lambda)$ дает фоновый сигнал рассеянного солнечного излучения (солнечная засветка). Если оставить в $E_{S \min}(\lambda)$ только эту составляющую (этот случай соот-

ветствует пределу ограничения фоновым шумом), то минимально обнаруживаемую энергию можно представить в виде [11]:

$$E_{S\min}(\lambda) \cong \mu \left\{ \frac{hcF_G K_r L_b \Delta \lambda S_r (\pi \alpha_r^2) \tau_d}{\lambda \eta(\lambda) \xi_e} \right\}^{1/2}. \quad (7)$$

3. Исследование влияния оптического состояния атмосферы на дальность зондирования

В формуле (1) для принимаемой мощности лазерного сигнала от оптического состояния атмосферы зависят три величины – показатель аэрозольного рассеяния $\sigma(z)$, индикатриса рассеяния атмосферы $\chi_\pi(z)$ и коэффициент пропускания атмосферы $T(z)$ (зависящий от показателя ослабления атмосферы $\varepsilon(z)$).

Приземной слой земной атмосферы большую часть времени находится в состоянии дымки или туманной дымки.

В условиях атмосферной дымки эмпирическая формула для показателя ослабления $\varepsilon(z)$ имеет вид [6]:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{3,91}{S_M} [n_0 + n_1 \lambda^{-n_2}] \quad (8)$$

где λ – длина волны излучения, мкм; S_M – метеорологическая дальность видимости, км; n_0, n_1, n_2 – эмпирические коэффициенты.

Свойства атмосферных дымок сильно зависят как от периода года (зимний, летний или весенне – осенний), так и от оптического состояния атмосферы на момент измерения.

Значения коэффициентов $\varepsilon(z)$ (полученные экспериментальным путем) для разных периодов года и некоторых оптических состояний атмосферы, приведены в таблице 1 (см., например, [13]).

Таблица 1 - Значения эмпирических коэффициентов в формуле (8).

Период	Тип погоды	n_0	n_1	n_2
Летний	Дымка радиационного происхождения (после сильного дождя)	0,00	0,40	1,88
	Устойчивая дымка, $S_M > 4$ км	0,06	0,36	1,88
Весенне-осенний	Дымка	0,10	0,45	1,30
	Туманная дымка	0,01	0,80	0,50
	Дымка с моросью	0,30	0,50	0,60
Зимний	«Ледяная» дымка	0,248	0,477	1,24
	Зимняя дымка	0,00	0,58	1,24
	Дымка со снегом	0,77	0,145	1,24

Для показателя аэрозольного рассеяния $\sigma(\lambda)$ имеем [13]:

$$\sigma(\lambda) = \frac{\varepsilon(\lambda)}{1 + \alpha(\lambda)} \quad (9)$$

где $\alpha(\lambda)$ – параметр, зависящий от длины волны, $\alpha(\lambda) = (0,1...0,2) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0 = 0,55 \text{ мкм}} \right)^{0,8}$.

Для индикатрисы аэрозольного рассеяния атмосферы $\chi_\pi(z)$ (в направлении «назад» на лидар) будем использовать следующую эмпирическую формулу:

$$\chi_\pi = 0,33\varepsilon(\lambda)^{-0,31} \quad (10)$$

При проведении расчётов коэффициенты пропускания передающей и приемной оптических систем принимались равными 0,9 и 0,7, соответственно. Радиус приемного объектива полагался равным 150 мм. Угол расходимости излучения лазерного локатора составлял $0,5 \cdot 10^{-3}$ рад, а поле зрения приемной оптической системы – $0,75 \cdot 10^{-3}$ рад. Солнечная постоянная и оптическая толщина атмосферы на длине волны излучения источника

$\lambda = 0,532$ мкм принимались соответственно равными $\pi S_\lambda = 0,196 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}$ и $\tau_o = 0,345$

[13]. Ширина спектрального фильтра приемной системы (был выбран фильтр LL01-532-12.5) составляла $\Delta\lambda = 2$ нм [16]. При расчетах полагалось $\frac{F_G}{\xi_e} = 2,5$. Зенитный угол Солнца

принимался равным $\theta_o = 45^\circ$. Трасса зондирования считалась горизонтальной. Отношение μ сигнал – шум задавалось равным 100.

В качестве источников излучения были выбраны твердотельные Nd:YAG лазеры фирмы Ekspla [17] NL319 (ламповая накачка, энергия в импульсе на длине волны 0,532 мкм – 5 Дж, длительность импульса 4-7 нс, частота повторения – 10 Гц) и NL231-100 (диодная накачка, энергия в импульсе на длине волны 0,532 мкм 90 мДж, длительность импульса 2-4 нс, частота повторения – 100 Гц).

В качестве фотодетектора был выбран фотоэлектронный умножитель R5070A фирмы Hamamatsu [18] со спектральной чувствительностью на длине волны 0,532 мкм ~ 50 мА/Вт, полосой пропускания 53 МГц и темновым током 3 нА.

Оценку дальности зондирования лидара можно получить из условия равенства мощности (энергии) принимаемого лидарного сигнала и пороговой мощности (энергии) приемника лидара.

Для оценки дальности зондирования будем использовать формулы (1), (2) для мощности и энергии лидарного сигнала и формулы (3) и (6) для пороговой мощности и минимально обнаруживаемой энергии импульсного лазерного сигнала.

На рисунках 1 и 2 представлены результаты оценки дальности зондирования по формулам (1) и (3). На рисунке 1 показаны результаты для лазерного источника с ламповой накачкой и энергией в импульсе 5 Дж, а на рисунке 2 - для лазерного источника с диодной накачкой и энергией в импульсе 90 мДж.

Рис. 1. Результаты оценки дальности зондирования по формулам (1) и (3) для лазерного источника с ламповой накачкой и энергией в импульсе 5 Дж

Рис. 2. Результаты оценки дальности зондирования по формулам (1) и (3) для лазерного источника с диодной накачкой и энергией в импульсе 90 мДж

На рисунках 1 и 2 (и на приведенных ниже рисунках 3-5) приведены результаты расчетов для различных оптических состояний приземного слоя атмосферы (см. таблицу 1): 1 - летний период: устойчивая дымка, $S_M=20$ км; 2 – летний период: радиационная дымка $S_M=15$ км; 3 – летний период: радиационная дымка $S_M=12$ км; 4 - летний период: устойчивая дымка, $S_M=10$ км; 5 - зимний период: зимняя дымка, $S_M=10$ км; 6 - зимний период: ледяная дымка, $S_M=8$ км; 7 - зимний период: зимняя дымка, $S_M=6$ км; 8 - зимний период: дымка со снегом, $S_M=5$ км; 9 - весенне – осенний период: дымка с моросью, $S_M=3$ км; 10 - весенне – осенний период: туманная дымка, $S_M=2$ км.

Из рисунков 1 и 2 видно, что в широком диапазоне оптического состояния приземного слоя атмосферы (метеорологическая дальность видимости меняется от 20 до 2 км) дальность зондирования для лазерного источника с ламповой накачкой и энергией в им-

пульсе 5 Дж изменяется в диапазоне от ~ 5 км до $\sim 1,4$ км, а для лазерного источника с диодной накачкой и энергией в импульсе 90 мДж изменяется в диапазоне от $\sim 1,8$ км до $\sim 0,8$ км.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты оценки дальности зондирования по формулам (2) и (6). На рисунке 3 показаны результаты для лазерного источника с ламповой накачкой и энергией в импульсе 5 Дж, а на рисунке 4 - для лазерного источника с диодной накачкой и энергией в импульсе 90 мДж.

Рис. 3. Результаты оценки дальности зондирования по формулам (2) и (6) для лазерного источника с ламповой накачкой и энергией в импульсе 5 Дж

Рис. 4. Результаты оценки дальности зондирования по формулам (2) и (6) для лазерного источника с диодной накачкой и энергией в импульсе 90 мДж

Рисунки 3 и 4 показывают, что в широком диапазоне оптического состояния приземного слоя атмосферы дальность зондирования для лазерного источника с ламповой накачкой и энергией в импульсе 5 Дж изменяется в диапазоне от $\sim 3,8$ км до $\sim 1,2$ км, а для

лазерного источника с диодной накачкой и энергией в импульсе 90 мДж изменяется в диапазоне от $\sim 1,1$ км до $\sim 0,64$ км.

Таким образом, оценка дальности зондирования по формулам (1) и (3) дает заметно большее значение дальности, чем оценки дальности зондирования по формулам (2) и (6).

Причина этого в приближенном характере формулы (2). Используя формулу для минимально обнаруживаемой энергии в случае предела ограничения фоновым шумом (7), были получены оценки дальности зондирования, приведенные на рисунке 5.

Рис. 5. Сравнение результатов оценки дальности зондирования по формулам (1), (3) и (2) и (7) для лазерного источника с ламповой накачкой и энергией в импульсе 5 Дж

На рисунке 5 ряд 1 (столбцы синего цвета) – оценка дальности зондирования по формулам (1) и (3), ряд 2 (столбцы красного цвета) – оценка дальности зондирования по формулам (2) и (7) в случае предела ограничения фоновым шумом.

Из рисунка видно, что полученная оценка дальности зондирования по формулам (2) и (7) в случае предела ограничения фоновым шумом хорошо согласуется с оценкой, полученной при использовании формул (1) и (3).

Таким образом, использование формул (1) и (3) дает завышенную оценку дальности за счет неполного учета всех влияющих факторов. Более корректно использовать для оценки дальности зондирования формулы (2) и (6).

Заключение

Проведено исследование влияния оптического состояния атмосферы на дальность зондирования ветрового корреляционного лидара и сравнение оценок дальности зондирования, полученных в рамках двух разных подходов к энергетическому расчету лидара. Показано, что подход, основанный на сравнении пороговой мощности приемника с принимаемой мощностью лазерного сигнала, дает завышенную оценку дальности зондирования за счет неполного учета всех влияющих факторов. В рамках другого подхода оценку

дальности зондирования получают, приравнивая минимально обнаруживаемую энергию приемника к энергии регистрируемого лазерного сигнала. Показано, что в рамках этого подхода в широком диапазоне оптического состояния приземного слоя атмосферы (метеорологическая дальность видимости меняется от 20 до 2 км) дальность зондирования (при использовании ФЭУ в качестве фотодетектора) для лазерного источника на длине волны 0,532 мкм с ламповой накачкой и энергией в импульсе 5 Дж изменяется в диапазоне от ~ 3,8 км до ~ 1,2 км, а для лазерного источника с диодной накачкой и энергией в импульсе 90 мДж изменяется в диапазоне от ~ 1,1 км до ~ 0,64 км.

Список литературы

1. Банах В.А., Смалихо И.Н., Фалиц А.В., Гордеев Е.В., Сухарев А.А. Измерения скорости и направления ветра с помощью двухлучевого метода доплеровским лидаром Stream Line в приземном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 8. С. 644–650.
2. Mylapore A.R., Schwemmer G.K., Prasad C.R., Lee S., Achey A., Hwang I.H., Mehta N., Yakshin M., Novoselov K., Prasad N.S. A three-beam aerosol backscatter correlation lidar for three-component wind profiling. // Proc. SPIE. 2014. V.9080. P. 90800Y-1 - 90800Y-9.
3. Wood C.R., Pauscher L., Ward H.C., Kotthaus S., Barlow J.F., Gouvea M., Lane S.E., Grimmond C.S.B. Wind observations above an urban river using a new lidar technique, scintillometry and anemometry // Sci. Total Environ. 2013. V. 442, N 1. P. 527–533.
4. Lane S.E., Barlow J.F., Wood C.R. An assessment of a three-beam Doppler lidar wind profiling method for use in urban areas // J. Wind Eng. Ind. Aerod. 2013. V. 119, N 8. P. 53–59.
5. Козинцев В.И., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А. Лазерный метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 5. С. 381–384.
6. Козинцев В. И., Иванов С. Е., Белов М. Л., Городничев В. А. Корреляционный лазерный метод с адаптивным выбором измерительной базы для оперативного измерения скорости ветра // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т.25. № 2. С. 165–170.
7. Савин А.В., Коняев М.А. Доплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов // Метеоспектр. 2008. № 1. С. 147–152.
8. Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В., Рыбалко В.С., Борцов Ю.Н., Шелефонтюк Д.И., Вороведин Ю.М. Оперативное определение компонентов скорости ветра с помощью лидара // Оптика атмосферы и океана. 1988. Т.1. № 2. С. 68–72.
9. Иванов С.Е., Филимонов П.А., Белов М.Л., Городничев В.А., Михайловская М.Б. Сравнительный анализ дальности зондирования ветрового корреляционного лидара в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 2. с. 220–232. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/696580.html> (дата обращения 02.08.2020).

10. Иванов С.Е., Филимонов П.А., Белов М.Л., Федотов Ю.В., Городничев В.А. Сравнительный анализ дальности зондирования для различных вариантов аэрозольного лидара. // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 01. С. 114–128. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/754084.html> (дата обращения 02.08.2020).
11. Measures R.M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Krieger Publishing Company: Melbourne, FL, United States. 1992. 524 p.
12. Матвиенко Г.Г., Заде Г.О., Фердинандов Э.С., Колев И.Н., Аврамова Р.П. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.
13. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации. М.: МГТУ, 2010. Издание 2-е дополненное. 572 с.
14. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. М.: МГТУ, 2002. 528 с.
15. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. СПб.: Папирус, 2003. 527 с.
16. 532 nm MaxLine laser clean-up filter. Part Number: LL01-532-12.5. Режим доступа: <http://www.semrock.com/FilterDetails.aspx?id=LL01-532-12.5> (дата обращения 02.08.2020).
17. Ekspla. Nanosecond Lasers. Режим доступа: <https://ekspla.com/products/nanosecond-lasers/> (дата обращения 02.08.2020).
18. Hamamatsu. Photomultiplier tubes (PMTs). Режим доступа: <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/pmt/index.html> (дата обращения 02.08.2020).

Impact Analysis of the Atmosphere Optical State on Wind Lidar Sounding Range

M.L. Belov^{1,*}, A.A. Samsonova¹, S.E. Ivanov¹,
V.A. Gorodnichev¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: laser monitoring, wind lidar sounding range, effects of the optical state of the atmosphere

One of the most important questions for correlation lidars is the sounding range question.

Correlation lidar sounding range greatly depends not only on the parameters of the equipment, but also on the optical state of the earth's atmosphere.

In addition, there are currently two approaches to the estimation of lidar sounding range. In one approach, an estimate of the sounding range is obtained by equating the detector threshold power to the laser signal power recorded by the detector. In another approach, an estimate of the sounding range is obtained by equating the minimum detectable energy of the detected laser signal energy.

This paper is about impact research of the atmosphere optical state on wind correlation lidar sounding range and compare sounding range estimates obtained under the two different approaches to the energy calculation lidar.

The analysis is carried out for the surface layer of the atmosphere, the horizontal sounding path and the radiation wavelength of 0.532 μm . In atmospheric haze conditions, an empirical formula is used for the attenuation factor. The signal-to-noise ratio is assumed to be 100.

Solid-state Nd:YAG Ekspla lasers NL319 (lamp pumping, pulse energy 5 J) and NL231-100 (diode pumping, pulse energy 90 mJ) were chosen as radiation sources.

Hamamatsu photomultiplier tube R5070A with radiant sensitivity $\sim 50 \text{ mA/W}$ was chosen as a detector.

It is shown that in a wide optical state range (meteorological range of visibility from 20 to 2 km) the lamp-pumped laser source sounding range with pulse energy 5 J varies from $\sim 3,8 \text{ km}$ to $\sim 1,2 \text{ km}$ and the diode-pumped laser source sounding range with pulse energy 90 mJ varies from $\sim 1,1 \text{ km}$ to $\sim 0,64 \text{ km}$.

The approach based on comparison of the detector threshold power with the received laser signal power overestimates the sounding range due to incomplete influencing consideration factors.

References

1. Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V., Gordeev E.V., Sukharev A.A. Stream Line Doppler lidar measurements of wind speed and direction with the duo-beam method in the atmospheric boundary layer. // *Atmospheric and oceanic optics*. V. 30. N. 8. P. 644–650.
2. Mylapore A.R., Schwemmer G.K., Prasad C.R., Lee S., Achey A., Hwang I.H., Mehta N., Yakshin M., Novoselov K., Prasad N.S. A three-beam aerosol backscatter correlation lidar for three-component wind profiling. // *Proc. SPIE*. 2014. V.9080. P. 90800Y-1 - 90800Y-9.
3. Wood C.R., Pauscher L., Ward H.C., Kotthaus S., Barlow J.F., Gouvea M., Lane S.E., Grimmond C.S.B. Wind observations above an urban river using a new lidar technique, scintillometry and anemometry // *Sci. Total Environ*. 2013. V. 442, N 1. P. 527–533.
4. Lane S.E., Barlow J.F., Wood C.R. An assessment of a three-beam Doppler lidar wind profiling method for use in urban areas // *J. Wind Eng. Ind. Aerod*. 2013. V. 119, N 8. P. 53–59.
5. Kozintsev V.I., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Laser method of approximate measurement of instantaneous wind velocity and direction. // *Atmospheric and oceanic optics*. 2013. V. 26. N. 5. P. 381–384.
6. Kozintsev V.I., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Laser correlation method with adaptive choice of measuring base for on-the-fly measurements of wind velocity. // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2012. V. 25. N. 4. P. 263–268.
7. Savin A.V., Konyaev M.A. Doppler meteo lidar for systems of ensuring vortex flight safety. // *Meteospektr*. 2008. N. 1. P. 147–152. (in Russian)
8. Matvienko G.G., Samokhvalov I.V., Rybalko V.S., Bortsov Yu.N., Shelefontyuk D.I., Vorevodin M.Yu. High-Data-Rate Lidar Sounding of Wind Velocity Components. // *Atmospheric and oceanic optics*. 1988. V. 1. N. 2. P. 68–72 (in Russian).
9. Ivanov S.E., Filimonov P.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Mikhailovskaya M.B. Comparative analysis of wind correlation lidar sounding range in UV, visible band and near IR bands. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, N. 2, P. 220–232. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/696580.html>, accessed_02.08.2020.
10. Ivanov S.E., Filimonov P.A., Belov M.L., Fedotov Yu.V., Gorodnichev V.A. Comparative Analysis of Sounding Range for Aerosol Lidar Alternate Designs . *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, N. 1, P. 114–128. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/754084.html>, accessed_02.08.2020
11. Measures R.M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Krieger Publishing Company: Melbourne, FL, United States. 1992. 524 p.
12. Matvienko G.G., Zade G. O., Ferdinandov E. S., et al. Korreliatsionnye metody lazernolokatsionnykh izmerenii skorosti vetra [Correlation methods of laser-radar measurements of wind speed]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 223 p. (in Russian).

13. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. Osnovy impul'snoi lazernoi lokatsii [The basics of pulsed laser location]. 2nd ed. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 573 p. (in Russian).
14. Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. Optikoelektronnye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoi sredy [Optical-electronic systems of environmental monitoring of the natural environment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 528 p. (in Russian).
15. Ishanin G.G., Pankov E.D., Chelibanov V.P. Priemniki izlucheniya [Radiation detectors]. St. Petersburg, Papirus Publ., 2003. 527 p. (in Russian).
16. 532 nm MaxLine laser clean-up filter. Part Number: LL01-532-12.5. Available at: <http://www.semrock.com/FilterDetails.aspx?id=LL01-532-12.5>, accessed 02.08.2020
17. Ekspla. Nanosecond Lasers. Available at: <https://ekspla.com/products/nanosecond-lasers/>, accessed 02.08.2020.
18. Hamamatsu. Photomultiplier tubes (PMTs). Available at: <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/pmt/index.html>, accessed 02.08.2020.