

Сравнительный анализ дальности зондирования ветрового корреляционного лидара в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах

02, февраль 2014

DOI: 10.7463/0214.0696580

Иванов С. Е., Филимонов П. А., Белов М. Л., Городничев В. А., Михайловская М. Б.

УДК 551.501

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ivanov_sergey2@mail.ru

ekomonit@bmstu.ru

belov@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

Введение

Для многих практических приложений наиболее перспективными дистанционными методами измерения скорости ветра являются лазерные (хотя возможности лазерных методов не перекрывают напрямую возможностей радиолокационных методов).

Величину скорости и направления ветра необходимо знать для прогноза погоды; охраны окружающей среды; при ликвидации последствий катастроф и чрезвычайных ситуаций (когда в атмосферу поступают вредные или ядовитые вещества); для обслуживания полетов летательных аппаратов; научных исследований и др. Причем для каждой задачи имеются свои специфические требования, что требует развития существующих лазерных методов измерения скорости и направления атмосферного ветра [1-6].

Дистанционные лазерные методы измерения скорости ветра разделяются на доплеровские и корреляционные. Более простыми (и, соответственно, требующими менее дорогую аппаратуру) являются корреляционные методы [1,2]. Хотя корреляционные методы обеспечивают меньшую дальность зондирования (по сравнению с доплеровскими), они являются наиболее подходящими для ряда практических приложений. Корреляционный лидар может измерять полный вектор скорости ветра и проводить измерения пространственного распределения скорости и направления ветра при сложном профиле скорости ветра, например, в условиях горного рельефа местности без пространственного сканирования [3].

На сегодняшний день практически все существующие ветровые корреляционные лидары работают в видимом диапазоне. Однако для задачи измерения ветра интерес представляют и другие диапазоны – ближний инфракрасный (ИК) диапазон и ультрафиолетовый (УФ) диапазон (с точки зрения безопасности для глаз и потенциальной возможности обеспечения больших дальностей зондирования из-за отсутствия или малости фонового излучения).

Данная статья посвящена сравнительному анализу дальности зондирования ветрового корреляционного лидара в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах.

1. Постановка задачи

Дальность зондирования лидара можно оценить из условия равенства (для предельной дальности зондирования) мощности полезного лидарного сигнала (приходящего на приемник) и пороговой мощности приемника лидара.

Лазерные корреляционные методы основаны на регистрации мощности $P(z)$ лазерного сигнала обратно рассеянного аэрозольными частицами, всегда присутствующими в земной атмосфере.

Мощность $P(z)$ лазерного сигнала в прозрачной атмосфере определяется следующим выражением [1,2]

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

где

P_o – мощность излучения лазерного источника;

K_t, K_r – коэффициенты пропускания оптических систем передающего и приемного каналов лидара;

c – скорость света;

τ_u – длительность импульса лазерного источника;

r_r – радиус приемного объектива;

z – расстояние от лидара до зондируемого объема атмосферы;

$\chi_\pi(z)$ – индикатриса рассеяния атмосферы в направлении «назад»;

$$T_v^{1/2}(z) = \exp\left(-\int_0^z \varepsilon(x) dx - \int_0^z k(x) dx\right) - \text{коэффициент пропускания атмосферы};$$

$\beta(z)$ – объемный коэффициент аэрозольного рассеяния атмосферы;

$\varepsilon(z)$ – показатель аэрозольного ослабления атмосферы;

$k(z)$ – показатель поглощения атмосферными газами (озоном в УФ диапазоне);

$G(z)$ – геометрическая функция лидара.

Для моностатической биаксиальной схемы зондирования функция $G(L)$ имеет вид

$$G(z) = \frac{\alpha_r^2}{\alpha_r^2 + \alpha_t^2} \exp\left\{-\frac{b^2}{(\alpha_r^2 + \alpha_t^2)z^2}\right\};$$

b - расстояние между оптическими осями источника и приемника излучения (база);

α_r, α_t - поле зрения приемной оптической системы и угол расходимости излучения источника.

Из формулы (1) видно, что анализ пространственных реализаций (зависимостей от z) мощности $P(z)$ обратно рассеянного атмосферным аэрозолем лазерного сигнала позволяет определять характеристики пространственных флуктуаций поля объемного коэффициента аэрозольного рассеяния атмосферы $\beta(z)$, а значит и измерять перемещение этого поля (т.е. проводить измерение параметров ветра).

Прием лазерного сигнала, обратно рассеянного средой, в общем случае производится на фоне шумов, которые ограничивают потенциальные возможности лидара.

Суммарная мощность шумов приемника лидара определяется собственными шумами регистрирующей аппаратуры и дробовым шумом. В качестве фотодетектора для корреляционных лидаров в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах обычно выбирается фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), т.к. он обладает большой чувствительностью и небольшими собственными шумами.

Пороговая мощность ФЭУ при наличии фонового излучения определяется формулой [7]

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

где

μ -отношение сигнал/шум;

$e=1.6 \cdot 10^{-19}$ [А·с] – заряд электрона;

$(I+B) \cong 2.5$;

Δf – эффективная полоса частот фотоприемного устройства;

S_k – спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ;

I_t – темновой ток фотокатода, т. к. в паспорте ФЭУ приведены значения темнового анодного тока

I_{ta} , то значения I_t рассчитываются по формуле $I_t = \frac{I_{ta}}{M}$, где M – коэффициент усиления ФЭУ ;

I_b - среднее значение тока, обусловленного солнечной засветкой.

Для приемника лидара с узким полем зрения и узкополосным спектральным фильтром выражение для I_b имеет вид [8,9]

$$I_b = K_r L_b S_r (\pi \alpha_r^2) S_k \Delta \lambda, \quad (3)$$

где

L_b - спектральная яркость фонового излучения;

S_r - площадь приемного объектива;

$\pi \alpha_r^2$ - телесный угол поля зрения приемной оптической системы;

$\Delta \lambda$ - полоса пропускания спектрального фильтра.

Коэффициент пропускания оптической системы приемного канала определяется выражением $K_r = K_o K_f$, где K_o – коэффициент пропускания оптической системы без спектрального фильтра; K_f – коэффициент пропускания спектрального фильтра.

Основным источником фонового излучения в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра является солнечное излучение, рассеянное земной атмосферой. Расчет яркости солнечного излучения, рассеянного земной атмосферой, представляет собой сложную задачу [8,9].

При высокой прозрачности атмосферы ($\tau_o \leq 0,2$) результаты, довольно близкие к реальным, могут быть получены в аналитическом виде для плоскопараллельной модели атмосферы в приближении однократного рассеяния. Выражение для яркости L_b фонового излучения,

приходящего на приемник, зависит от геометрической схемы зондирования. В частном случае зондирования в горизонтальном направлении величина L_b равна [8]

$$L_b = 0,25\lambda_s S_\lambda \chi(\gamma) \frac{\cos \theta_o}{\cos \theta - \cos \theta_o} \left\{ \exp\left[-\frac{\tau_o - \tau}{\cos \theta}\right] - \exp\left[-\frac{\tau_o - \tau}{\cos \theta_o}\right] \right\}, \quad 4)$$

где

$$\cos \gamma = \cos \theta \cos \theta_o + \sin \theta \sin \theta_o \cos(\varphi - \varphi_o);$$

λ_s - отношение показателя рассеяния аэрозольной земной атмосферы к показателю ослабления;

πS_λ - спектральная солнечная постоянная на длине волны λ (πS_λ равна спектральной освещенности площадки, перпендикулярной солнечному излучению, на верхней границе атмосферы);

τ_o, τ - оптическая толща всей земной атмосферы и оптическая толща земной атмосферы между подстилающей поверхностью и приемником (в вертикальном направлении);

θ, φ - зенитный угол и азимут направления наблюдения;

$\theta_o, \varphi_o = 0$ - зенитный угол и азимут Солнца;

$\chi(\gamma)$ - индикатриса рассеяния атмосферы;

γ - угол рассеяния.

Ниже проводится сравнительный анализ дальности зондирования ветрового корреляционного лидара, работающего на длинах волн 0,266 мкм и 0,355 мкм (УФ диапазон), 0,532 мкм (видимый диапазон) и 1,57 мкм (ближний ИК диапазон).

2. Математическое моделирование

В работе проводилась оценка дальности зондирования ветрового корреляционного лидара для следующих длин волн излучения лазерных источников:

- УФ диапазон: 0,266 мкм (четвертая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом), 0,355 мкм (третья гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом);
- видимый диапазон: 0,532 мкм (вторая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом);

- ближний ИК диапазон: 1,57 мкм (параметрический генератор света с накачкой от лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом).

Априорная неочевидность результатов сравнительного анализа дальности зондирования ветрового корреляционного лидара в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах связана с тем, что параметры атмосферы (показатель аэрозольного ослабления, показатель поглощения озоном, оптическая толщина земной атмосферы и другие), спектральная солнечная постоянная, а также характеристики лазеров и фотоэлектронных умножителей имеют существенную (и для разных параметров сильно различающуюся) зависимость от длины волны излучения.

Параметры источников и приемников излучения и оптические характеристики атмосферы, используемые в работе, приведены ниже в Таблицах 1-6.

Таблица 1

Характеристики лазеров для разных длин волн [10,11]

λ , мкм	0,266	0,355	0,532	1,57
Энергия в импульсе, мДж	40	70	175	50
Длительность импульса, нс	5 - 7	5 - 7	5 - 7	2 - 10
Частота повторения, Гц	20	20	20	30

Таблица 2

Характеристики ФЭУ для разных длин волн [12]

λ , мкм	0,266	0,355	0,532	1,57*
Спектральная чувствительность, мА/Вт	30	70	80	20
Темновой ток, А	$0,8 \cdot 10^{-15}$	10^{-16}	$4 \cdot 10^{-15}$	$4 \cdot 10^{-14}$
Фоновый ток, А	0	$5,5 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$

* - охлаждаемый приемник

Таблица 3

Показатели аэрозольного ослабления атмосферы [8]

λ , мкм	0,266	0,355	0,532	1,57
Показатель ослабления, м^{-1} .	$9,77 \cdot 10^{-4}$	$6,79 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$

Таблица 4

Суммарный показатель ослабления из-за поглощения озоном и молекулярного рассеяния [13]

λ , мкм	0,266	0,355	0,532	1,57
Суммарный показатель ослабления, м^{-1} .	10^{-3}	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$1,7910^{-7}$

Таблица 5

Оптическая толща земной атмосферы [8]

λ , мкм	0,266	0,355	0,532	1,57
Оптическая толща, отн.ед.	8,385	0,9155	0,405	0,135

Таблица 6

Спектральная солнечная постоянная [8]

λ , мкм	0,266	0,355	0,532	1,57
Спектральная солнечная постоянная, $\text{Вт/см}^2_{\text{мкм}}$	0,021	0,116	0,195	0,0234

Из Таблиц 1-6 хорошо видно сильная спектральная зависимость, приведенных в таблицах величин. Расчеты проводились для горизонтальной трассы зондирования при метеорологической дальности видимости 10 км, безоблачной атмосфере и зенитном угле Солнца 45° . Угол расходимости излучения лидара и поле зрения приемной оптической системы полагались равными, соответственно, 1 мрад и 2 мрад, а коэффициенты пропускания передающей и приемной оптических систем – 0,8 и 0,28. Диаметр приемного объектива и ширина спектрального фильтра считались равными 0,2 м и 1 нм, а отношение сигнал/шум – 30 (отношение сигнал/шум выбрано таким, чтобы регистрировать неоднородности поля объемного коэффициента аэрозольного рассеяния [1]).

При расчете по формуле (4) для УФ диапазона оптические толщи τ_o , τ состоят из суммы аэрозольной и молекулярной компонент и оптической толщи поглощения атмосферного озона, а индикатриса $\chi(\gamma)$ рассеяния атмосферы состоят из взвешенной суммы аэрозольной и молекулярной составляющих [8,13].

На рисунках 1 – 4 приведены полученные по формулам (1) – (4) зависимости мощности $P(z)$ полезного сигнала и пороговой мощности $P_{\text{пд}}$ от дальности зондирования z для лазерных длин волн 0,266; 0,355; 0,532 и 1,57 мкм.

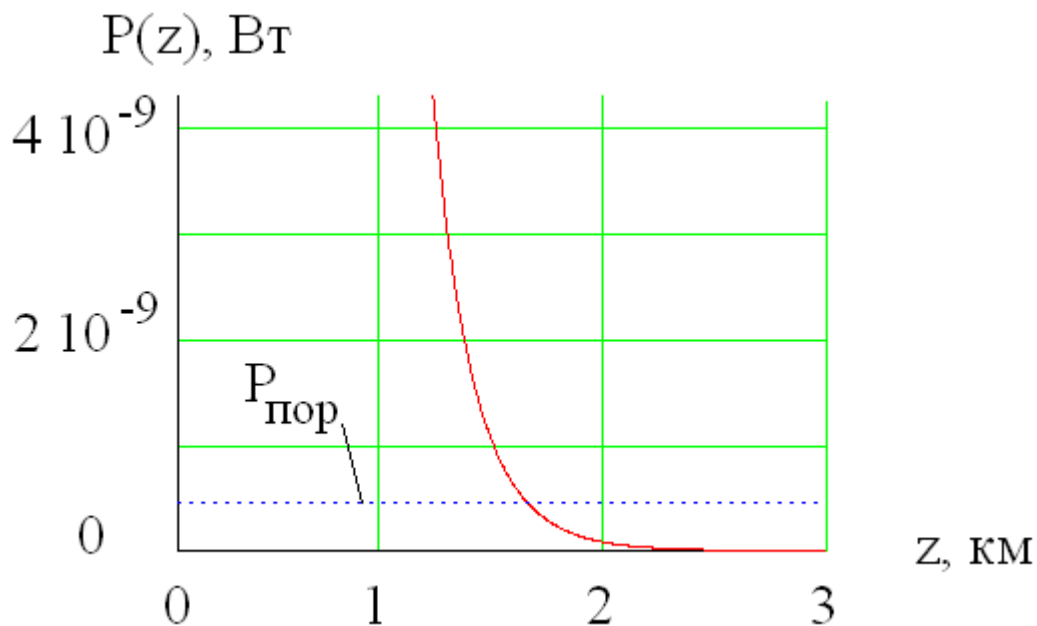


Рис. 1 Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 0,266 мкм

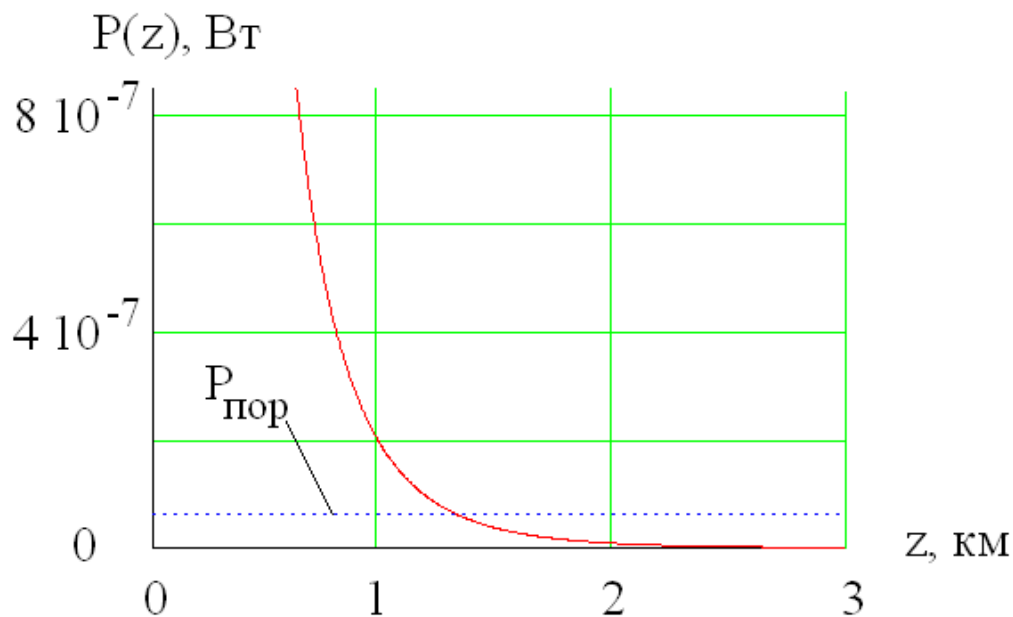


Рис. 2 Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 0,355 мкм

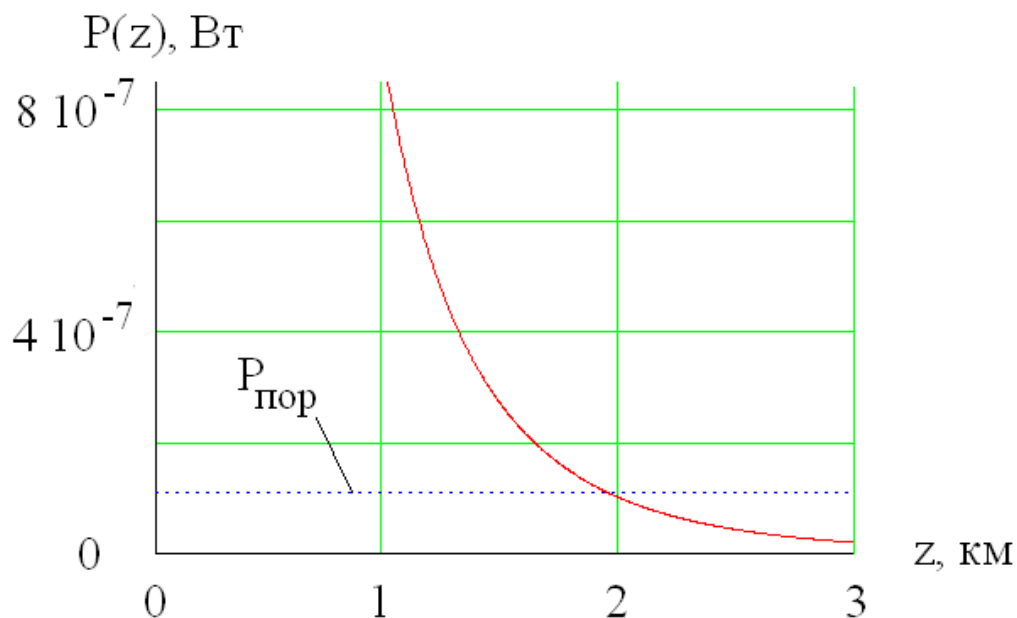


Рис. 3 Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 0,532 мкм

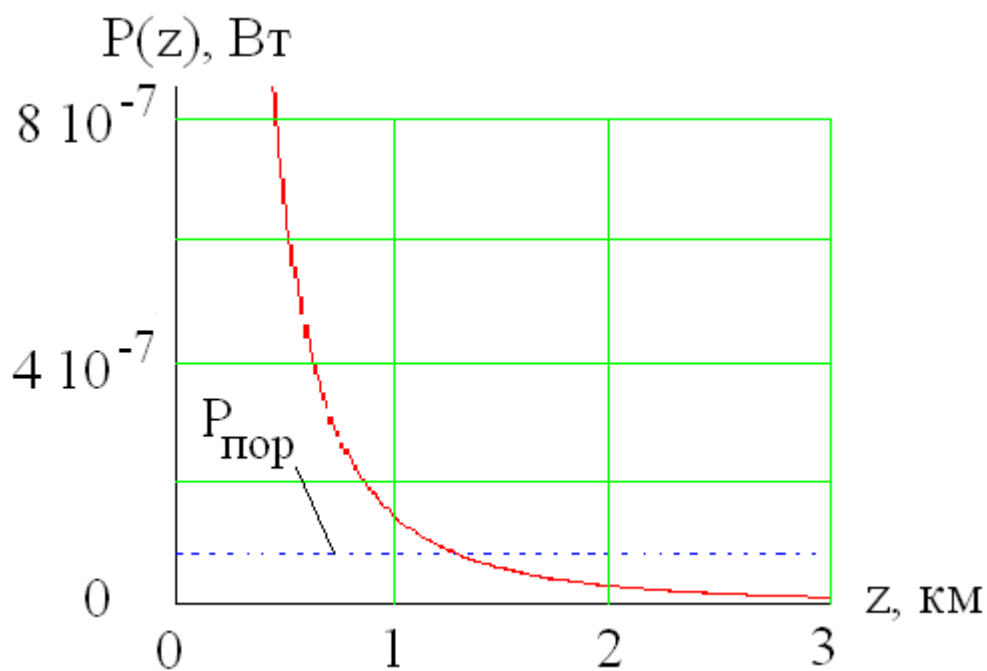


Рис. 4 Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 1,57 мкм

Предельные дальности зондирования оценивались из условия равенства мощности $P(z)$ полезного сигнала и пороговой мощности приемника $P_{\text{пд}}$. Для длин волн 0,266; 0,355; 0,532 и 1,57 мкм предельные дальности зондирования приведены в Таблице 7.

Предельные дальности зондирования

λ , мкм	0,266	0,355	0,532	1,57
Предельная дальность зондирования, м	1660	1335	1955	1275

Из результатов, приведенных в таблице 7 видно, что для длин волн 0,266, 0,355 мкм (УФ диапазон), 0,532 мкм (видимый диапазон) и 1,57 мкм (ближний ИК диапазон) для горизонтальной трассы зондирования при выбранных значениях параметров (которые на сегодняшний день реально могут быть обеспечены) предельная дальность зондирования лежит в довольно узком диапазоне 1275 м – 1955 м.

Максимальная дальность зондирования соответствует видимому спектральному диапазону. При этом, как с увеличением длины волны излучения (переходе в ближний ИК диапазон), так и при уменьшении длины волны (переходе в УФ диапазон) дальность зондирования уменьшается. Это обусловлено влиянием следующих причин:

- при переходе в ближний ИК диапазон уменьшается показатель рассеяния атмосферы, причем этот эффект сглаживается одновременным уменьшением фонового излучения;
- при переходе в УФ диапазон увеличивается ослабление атмосферы (в основном из-за поглощения озоном), причем этот эффект сглаживается одновременным увеличением показателя аэрозольного рассеяния атмосферы и уменьшением фонового излучения.

Уменьшение дальности зондирования при переходе в ближний ИК или УФ диапазон не особенно велико и может быть скомпенсировано изменением параметров передающего или приемного каналов лидара.

Заключение

Для обеспечения максимальной дальности зондирования ветрового корреляционного лидара наиболее перспективным является видимый спектральный диапазон. При дополнительных требованиях к лидару, например, при требовании работы на безопасной для глаз длине волны излучения эффективная работа лидара может быть обеспечена в ультрафиолетовом (0,355 мкм) или ближнем инфракрасном (1,57 мкм) спектральных диапазонах при сравнительно небольшом уменьшении дальности зондирования.

Список литературы

1. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Заде, Э.С. Фердинандов, И.Н. Колев, Р.П. Аврамова. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.
2. Применение корреляционных методов в атмосферной оптике / В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов, Н.И. Юрга, М.Л. Белов, А.Ф. Овчаренко. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.
3. 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.
4. Смалихо И.Н., Банах В.А., Копп Ф., Вернер Х. Лидарные измерения среднего ветра // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15, № 8. С. 672-679.
5. Zhi-Shen Liu, Dong Wu, Jin-Tao Liu, Kai-Lin Zhang, Wei-Biao Chen, Xiao-Quan Song, Johnathan W. Hair, Chiao-Yao She. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter // Applied Optics. 2002. Vol. 41, no. 33. P. 7079-7086.
6. Савин А.В., Коняев М.А. Доплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов // Метеоспектр. 2008. № 1. С. 147-152.
7. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. 2-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.
8. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. 2-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 572 с.
9. Сигналы и помехи в лазерной локации / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.М. Креков, В.Л. Миронов, Ю.С. Балин, В.А. Банах, М.Л. Белов, Ю.Д. Копытин, В.П. Лукин. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
10. Compact high energy, high frequency pulsed Nd:YAG lasers. Режим доступа: http://www.litronlasers.com/pdf%20files/LitronNanoTRL_0105_2.pdf (дата обращения 20.12.2013).
11. DQ-1570-50/30 Nd:YAG laser datasheet. Режим доступа: <http://www.oem-tech.by/pdf/dq-1570-ds-en.pdf> (дата обращения 20.12.2013).
12. Hamamatsu: сайт. Режим доступа: <http://jp.hamamatsu.com/resources/products/> (дата обращения 20.12.2013).
13. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Расчет яркости фона и ослабления лазерного излучения в ультрафиолетовой области спектра. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 66 с.

Comparative analysis of wind correlation lidar sounding range in UV, visible band and near IR bands

02, February 2014

DOI: 10.7463/0214.0696580

S.E. Ivanov, P.A. Filimonov, M.L. Belov, V.A. Gorodnichev, M.B. Mikhailovskay

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

ivanov_sergey2@mail.ru

ekomonit@bmstu.ru

belov@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

The paper presents a comparative analysis of the sounding range of wind correlation lidar in ultraviolet, visible, and near infrared spectral bands. It shows that a visible spectral band is the most advanced one to provide a maximum sounding range of wind correlation lidar in earth atmosphere. If there are specific requirements for wind correlation lidar, for example, a requirement is that a wind correlation lidar should operate at the eye-safe laser sounding wavelength then the efficient work of wind correlation lidar may be maintained in ultraviolet and near infrared spectral bands with the sounding range reduced a little bit.

Publications with keywords: [parametric synthesis](#), [optical system](#), [double conjugation system](#)

Publications with words: [parametric synthesis](#), [optical system](#), [double conjugation system](#)

References

1. Matvienko G.G., Zade G. O., Ferdinandov E. S., et al. *Korreliatsionnye metody lazerno-lokatsionnykh izmerenii skorosti vetra* [Correlation methods of laser-radar measurements of wind speed]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 223 p. (in Russian)
2. Orlov V.M., Matvienko G.G., Samokhvalov I.V., et al. *Primenenie korreliatsionnykh metodov v atmosferno optike* [Application of correlation methods in atmospheric optics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 160 p. (in Russian)
3. 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]. *Optika atmosfery i*

okeana, 2012, vol. 25, no. 2, pp. 165-170. (English translation: *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2012, vol. 25, iss. 4, pp. 263-268. DOI: 10.1134/S1024856012040070)

4. Smalikho I.N., Banakh V.A., Kopp F., Verner Kh. [Laser remote sensing of the mean wind]. *Optika atmosfery i okeana*, 2002, vol. 15, no. 8, pp. 672-679. (English translation: *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2002, vol. 15, iss. 8, pp. 607-614).

5. Zhi-Shen Liu, Dong Wu, Jin-Tao Liu, Kai-Lin Zhang, Wei-Biao Chen, Xiao-Quan Song, Johnathan W. Hair, Chiao-Yao She. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter. *Applied Optics*, 2002, vol. 41, no. 33, pp. 7079-7086.

6. Savin A.V., Konyaev M.A. [Doppler meteo lidar for systems of ensuring vortex flight safety]. *Meteospektr*, 2008, no. 1, pp. 147-152. (in Russian)

7. Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Optiko-elektronnye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoi sredy* [Optical-electronic systems of environmental monitoring of the natural environment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 528 p. (in Russian)

8. 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]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 572 p. (in Russian)

9. Orlov V.M., Samokhvalov I.V., Krekov G.M., Mironov V.L., Balin Yu.S., Banakh V.A., Belov M.L., Kopytin Yu.D., Lukin V.P. *Signaly i pomekhi v lazernoy lokatsii* [Signals and noise in laser ranging]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1985. 264 p. (in Russian)

10. *Compact high energy, high frequency pulsed Nd:YAG lasers*. Available at: http://www.litronlasers.com/pdf%20files/LitronNanoTRL_0105_2.pdf , accessed 20.12.2013.

11. *DQ-1570-50/30 Nd:YAG laser datasheet*. Available at: <http://www.oem-tech.by/pdf/dq-1570-ds-en.pdf> , accessed 20.12.2013.

12. *Hamamatsu: website*. Available at: <http://jp.hamamatsu.com/resources/products/> , accessed 20.12.2013.

13. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Raschet yarkosti fona i oslableniya lazernogo izlucheniya v ul'trafioletovoy oblasti spectra* [Calculation of background luminance and laser attenuation in ltraviolet region of spectrum]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 66 p. (in Russian)