Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0408

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2016. № 09. С. 24–34.

DOI: **10.7463/0916.0845030**

Представлена в редакцию: 11.08.2016
Исправлена: 25.08.2016

УДК 551.501

Сравнительная оценка отношения сигнал-шум для лидаров дистанционного зондирования на безопасных для зрения лазерных длинах волн

Филимонов П. А.[1], Иванов С. Е.[1], Белов М. Л.[1,*], Городничев В. А.[1], Кувшинов А. В.[1]

[*]belov@bmstu.ru

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

Проведен сравнительный анализ эффективности использования (с точки зрения величины отношения сигнал-шум) безопасных для зрения лазерных длин волн зондирования 0,355 мкм и 1,54 мкм в ближней ультрафиолетовой и ближней инфракрасной спектральных областях для задачи дистанционного зондирования земной атмосферы. Показано, что величина отношения сигнал-шум заметно больше на лазерной длине волны зондирования 0,355 мкм. Причем, преимущество длины волны зондирования 0,355 мкм растет с увеличения расстояния z от лазерного локатора и при z=4 км величина отношения сигнал-шум на длине волны зондирования 0,355 мкм в два раза больше величины отношения сигнал-шум на длине волны зондирования 1,54 мкм

Ключевые слова: лидар, безопасные для зрения лазерные длины волн, отношения сигнал-шум

Введение

В настоящее время практически все разрабатываемые и новые созданные лазерные системы работают на безопасных для зрения длинах волн (или на потенциально опасных длинах волн, но при небольшом уровне мощности, обеспечивающим безопасность для зрения) [1-3].

Лазерное излучение видимого и ближнего инфракрасного (0,38 – 1,4 мкм) диапазонов спектра может вызвать повреждение сетчатки глаза. В тоже время воздействие излучения ультрафиолетового (0,18 – 0,38 мкм) или инфракрасного (>1,4 мкм) диапазонов является более безопасным (оно воздействует на передние среды глаза) [4].

На сегодняшний день в разрабатываемых и новых созданных лазерных систем (локации, дальнометрии, высотометрии и т.п.) используют (для обеспечения безопасности зрения) инфракрасный (>1,4 мкм) диапазон. В тоже время интерес (для разработки таких систем) представляет и ультрафиолетовый диапазон. При этом наиболее перспективной здесь является длина волны 0,355 мкм (третья гармоника лазера на ИАГ:Nd^{+3}), так как поглощение атмосферным озоном еще невелико (в спектральном диапазоне 0,25 – 0,38 мкм поглощение озоном увеличивается с уменьшением длины волны).

Анализ эффективности использования безопасных для зрения длин волн излучения для широкого круга задач дистанционного зондирования с точки зрения возможностей лазерных источников в УФ и ближней ИК спектральных областей исследовалась в [5-7].

В данной работе анализ эффективности использования безопасных для зрения лазерных длин волн 0,355 и 1,54 мкм в УФ и ближней ИК спектральных областей для задачи дистанционного зондирования атмосферы проводится с точки зрения отношения сигнал-шум.

2. Расчет отношения сигнал-шум на выходе фотодетектора

Для задачи дистанционного зондирования атмосферы (в случае приема лазерного эхо-сигнала от атмосферного аэрозоля) выражение для отношения сигнал-шум μ на выходе фотодетектора (фотоэлектронного умножителя или лавинного фотодиода) оптического диапазона (для одного импульса) можно записать в виде [8]:

$$\mu = \frac{E_S(\lambda)}{\sqrt{E(\lambda)[E_S(\lambda) + E_b^N(\lambda) + \dfrac{i_d + i_j}{2eB^*} E(\lambda)]}} \qquad (1)$$

где

$E_S(\lambda)$ - энергия лазерного эхо-сигнала от атмосферного аэрозоля, приходящего на фотодетектор (за время детектирования τ_d);

для УФ диапазона

$$E_S(\lambda, z) = P_o K_t K_r c \tau_t r_r^2 \tau_d (\beta(z)\chi_\pi(z) + \beta_M(z)\chi_{M\pi}(z)) T_v(z) G(z)/8, \qquad (2)$$

для ближнего ИК диапазона

$$E_S(\lambda, z) = P_o K_t K_r c \tau_t r_r^2 \tau_d \beta(z)\chi_\pi(z) T_v(z) G(z)/8, \qquad (3)$$

$$E(\lambda) = \frac{hcF_G}{\lambda\eta(\lambda)\xi_e};\ B^* = \frac{BF_G}{\xi_e};\ B = \frac{1}{2\tau_d};\ i_j = \frac{2kT}{eG^2\xi_e R_{eq} F_G};$$

$E_b^N(\lambda)$ - энергия (за время детектирования τ_d) фонового излучения ;

$$E_b^N(\lambda) = L_b(\lambda)\Delta\lambda\Omega_o A_o \tau_d, \qquad (4)$$

$\eta(\lambda)$ - квантовый выход на длине волны λ;

i_d - средний темновой ток фотокатода ФЭУ (ток утечки лавинного фотодиода);

i_j - эффективный ток Джонсона;

G - усиление фотодетектора;

F_G - параметр усиления шума ($F_G \sim$ 1-2,5); $\xi_e \sim 1$; при расчетах полагалось $\dfrac{F_G}{\xi_e} \approx 1$ [8];

R_{eq} , T - эквивалентное сопротивление нагрузки выходной цепи и его абсолютная температура;
k - постоянная Больцмана ;
$L_b(\lambda)$ - спектральная яркость фонового излучения;
$\Delta\lambda$ - ширина полосы пропускания спектрального фильтра приемной системы;
Ω_o - телесный угол поля зрения оптической приемной системы ($\Omega_o = \pi\alpha_r^2$);
A_o - площадь приемного объектива;
P_o – мощность излучения лазерного источника локатора;
K_r, K_t – коэффициенты пропускания приемной и передающей оптических систем лазерного локатора;
c - скорость света;
τ_t – длительность импульса лазерного источника локатора;
r_r – радиус приемного объектива;
$\beta(z)$ – показатель аэрозольного рассеяния земной атмосферы на длине волны излучения лазерного локатора на расстоянии z от лазерного локатора;
$\beta_M(z)$ – показатель молекулярного рассеяния земной атмосферы на длине волны излучения лазерного локатора на расстоянии z от лазерного локатора;
z – расстояние от лазерного локатора до объема атмосферы (от которого в момент времени t приходит сигнал обратного рассеяния на приемник);
$\chi_\pi(z)$ – индикатриса аэрозольного рассеяния атмосферы в обратном направлении («назад»);
$\chi_{M\pi}(z)$ – индикатриса молекулярного рассеяния атмосферы в обратном направлении («назад»);

$$T_\nu^{1/2}(z) = exp\left(-\int_0^z \varepsilon(x)dx - \int_0^z k(x)dx - \int_0^z \beta_M(x)dx \right);$$

$T_\nu^{1/2}(z)$ - коэффициент пропускания земной атмосферы на трассе «локатор – объем атмосферы на расстоянии z от локатора»;
$\varepsilon(z)$ – показатель аэрозольного ослабления атмосферы на длине волны излучения лазерного локатора;
$\mathrm{k}(z)$ – показатель поглощения атмосферными газами на длине волны излучения лазерного локатора;
$G(z)$ – геометрическая функция лазерного локатора.

Для моностатической биаксиальной схемы локации с параллельными оптическими осями источника и приемника функция $G(z)$ имеет вид (в гауссовом приближении для лазерного пучка и поля зрения оптической приемной системы)

$$G(z)=\frac{\alpha_r^2}{r_r^2+r_t^2+z^2(\alpha_r^2+\alpha_t^2)}\exp\{-\frac{b^2}{r_r^2+r_t^2+(\alpha_r^2+\alpha_t^2)z^2}\},$$

b - база (расстояние между оптическими осями приемной системы и лазерного пучка локатора);

α_r, α_t - поле зрения приемной оптической системы и угол расходимости излучения лазерного локатора;

r_t – эффективный радиус передающей апертуры.

В работе проводится оценка отношения сигнал-шум для задачи дистанционного зондирования приземного слоя атмосферы на безопасных для зрения лазерных длин волн 0,355 и 1,54 мкм в УФ и ближней ИК спектральных областей при регистрации излучения фотоэлектронными умножителями и лавинными фотодиодами (с наилучшими для соответствующих длин волн характеристиками чувствительности).

3. Сравнительный анализ отношения сигнал-шум при регистрации лазерного сигнала ФЭУ и лавинными фотодиодами на длинах волн зондирования 0,355 и 1,54 мкм

На длине волны 0,355 мкм расчеты проводились для модуля ФЭУ H10721-210 [9] (со спектральной катодной чувствительностью $S_k=\frac{e\lambda\eta(\lambda)}{hc}$ на длине волны 0,355 мкм – 100 мА/ Вт. τ_d=0,57 нс. i_d=1 нА) и лавинного фотодиода S8664 - 20K [10] (со спектральной катодной чувствительностью на длине волны 0,355 мкм - 160 мА/ Вт. i_d~1 нА. Полоса 300 МГц).

Спектральная солнечная постоянная на длине волны 0,355 мкм равна 0,116 Вт/см^{2}мкм, оптическая толща земной атмосферы τ_o=0,92 (они используются при расчете спектральной яркости фонового излучения) [13]. Ширина спектрального фильтра приемной системы $\Delta\lambda$ считалась равной 1,3 нм.

На длине волны 1,54 мкм расчеты проводились для охлаждаемого ФЭУ Hamamatsu H10330A-75 [11] (с квантовой эффективностью фотокатода η на длине волны 1500 нм – 2% , что соответствует спектральной катодной чувствительности $S_k=\frac{e\lambda\eta}{hc}$=24 мА/ Вт. τ_d=1,6 нс. i_d=40 нА) и лавинного фотодиода G8931-20 [12] (со спектральной чувствительностью на длине волны 1550 нм – 900 мА/ Вт. i_d=150 нА. Полоса 300 МГц).

Спектральная солнечная постоянная на длине волны 1,54 мкм равна 0,0244 Вт/см^{2}мкм, оптическая толща земной атмосферы τ_o=0,135 [3]. Ширина спектрального фильтра приемной системы $\Delta\lambda$ считалась равной 10 нм.

Для всех фотоприемников считалось, что R_{eq}=50 Ом. T=300 K. При расчете спектральной яркости фонового излучения [3,13] полагалось, что земная атмосфера безоблачная, зенитный угол Солнца 45^{o}, трасса зондирования - горизонтальная. Угол поля зрения приемной оптической системы полагался равным 2 мрад, а коэффициент пропускания приемной оптической системы 0,64. Диаметр приемного объектива считался равным 0,3 м. Суммарный показатель ослабления атмосферы на длине волны 0,355 мкм - 0.537 км $^{-1}$, суммарный показатель рассеяния «назад» - 0.076 км $^{-1}$. Суммарный показатель ослабления атмосферы на длине волны 1,54 мкм - 0.28 км $^{-1}$, суммарный показатель рассеяния «назад» - 0.0073 км $^{-1}$ [3,13].

Результаты расчетов отношения сигнал-шум μ от расстояния z (от лазерного локатора до рассеивающего объема атмосферы) представлены на рисунках 1 – 4 для длин волн излучения 0,355 мкм и 1,54 мкм в двух случаях – когда фотодетектором служит ФЭУ и лавинный фотодиод.

На всех рисунках кривая 1 – это результаты расчетов при учете всех шумов, 2 - при учете всех шумов, но без дробового шума, вызванного самим сигналом; 3 - при учете всех шумов, но без дробового шума, вызванного фоновым (из-за рассеяния солнечного света на атмосферном аэрозоле) излучением; 4 - при учете всех шумов, но без учета темнового тока фотодетектора; 5 - при учете всех шумов, но без учета теплового шума (шума Джонсона), связанного с эквивалентным сопротивлением нагрузки выходной цепи.

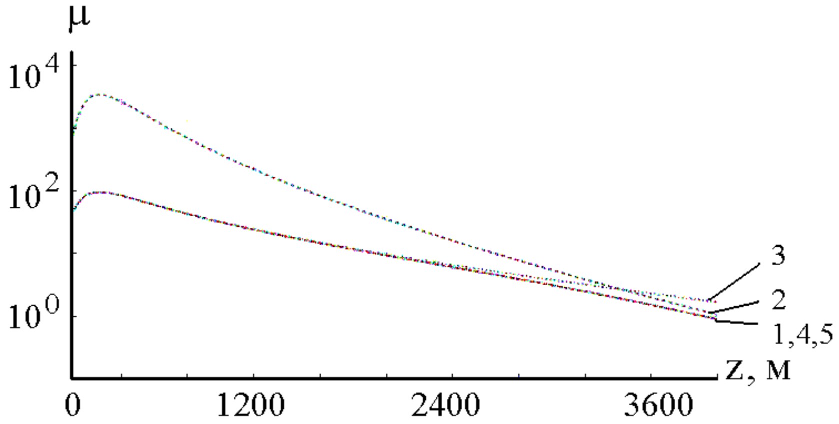

Рис.1 Зависимость отношения сигнал-шум от расстояния z для ФЭУ H10721-210

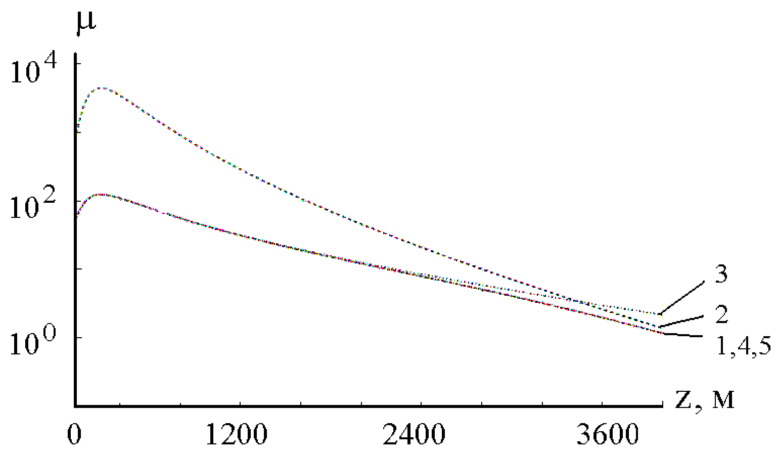

Рис.2 Зависимость отношения сигнал-шум от расстояния z для лавинного фотодиода S8664 - 20K

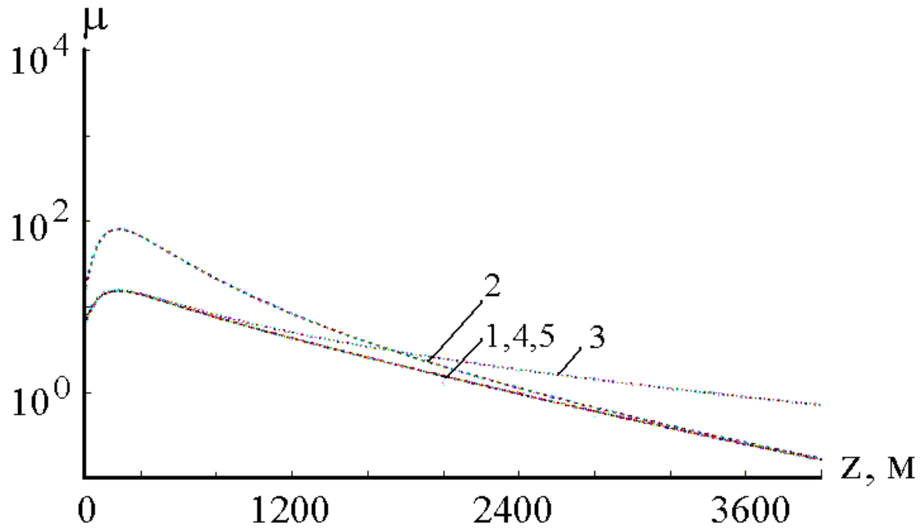

Рис.3 Зависимость отношения сигнал-шум от расстояния z для ФЭУ H10330A-75

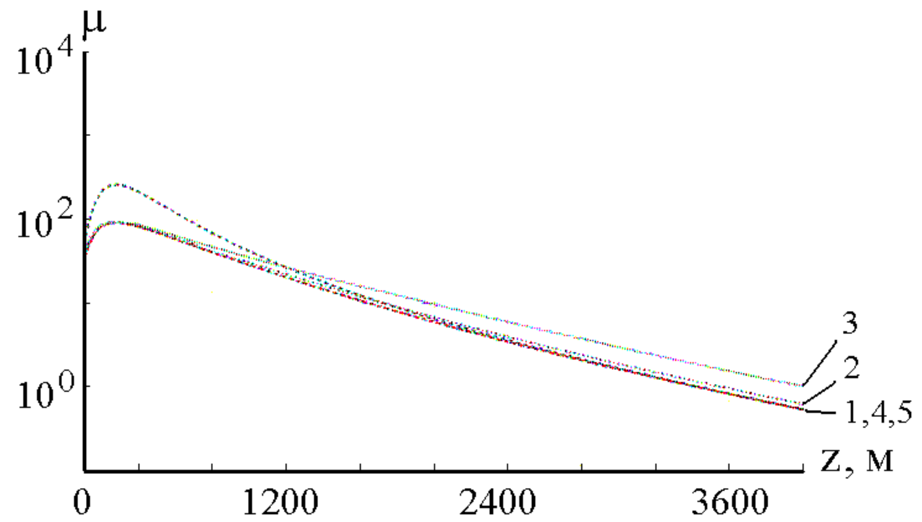

Рис.4 Зависимость отношения сигнал-шум от расстояния z для лавинного фотодиода G8931-20

Рисунок 1 приведен для ФЭУ H10721-210 (длина волны зондирования 0,355 мкм), рисунок 2 – для лавинного фотодиода S8664 - 20K (длина волны зондирования 0,355 мкм), рисунок 3 – приведен для ФЭУ H10330A-75 (длина волны зондирования 1,54 мкм), рисунок 4 – для лавинного фотодиода G8931-20 (длина волны зондирования 1,54 мкм).

Из рисунков 1,2 видно, что на длине волны 0,355 мкм для лавинного фотодиода отношение сигнал-шум несколько лучше, чем для фотоэлектронного умножителя (из-за несколько лучшей спектральной чувствительности на длине волны 0,355 мкм). При этом, на расстояниях z «лидар - рассеивающий объем атмосферы» меньших 3,5 км основной составляющей шума является дробовой шум, вызванный самим сигналом.

Сравнение рисунков 3,4 (для длины волны 1,54 мкм) показывает уже существенное (почти на порядок) преимущество лавинного фотодиода в значении сигнал-шум. При этом, дробовой шум, вызванный самим сигналом, является основной составляющей шума на небольших расстояниях z «лидар - рассеивающий объем атмосферы» (меньших 1,2 -1,6 км).

В целом из рисунков 1-4 видно заметное преимущество (в значении сигнал-шум) на длине волны зондирования 0,355 мкм. Причем, это преимущество увеличивается с увеличения расстояния z и при z=4 км значение сигнал-шум на длине волны зондирования 0,355 мкм в два раза больше значения сигнал-шум на длине волны 1,54 мкм.

Заключение

Проведен анализ эффективности использования (с точки зрения отношения сигнал-шум) безопасных для зрения лазерных длин волн 0,355 и 1,54 мкм в УФ и ближней ИК спектральных областей для задачи дистанционного зондирования атмосферы. Показано, что отношение сигнал-шум заметно больше на длине волны зондирования 0,355 мкм. Причем, это преимущество увеличивается с увеличения расстояния z от лазерного локатора и при z=4 км значение сигнал-шум на длине волны зондирования 0,355 мкм в два раза больше значения сигнал-шум на длине волны 1,54 мкм.

Список литературы

1. Pal S., Behrendt A., Radlach M., Schaberl T., Wulfmeyer V. Eye-safe scanning aerosol lidar at 355 nm. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/271842779_Conference_Pal_et_al_ILRC_2006 (дата обращения 20.06.2016).
2. Разенков И.А. Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 52-63.
3. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации. М.: Изд-во МГТУ, 2010. 572 с.
4. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. Введен 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2013. 20 с.
5. 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. № 1. С. 114-128. DOI: 10.7463/0115.0754084
6. 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. DOI: 10.7463/0214.0696580
7. Белов М.Л., Городничев В.А., Кравцов Д.А., Черпакова А.А. Выбор безопасных для зрения длин волн излучения в УФ и ближнем ИК спектральных диапазонах для задач

дистанционного зондирования // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 2. С. 105-122. DOI: 10.7463/0216.0832497

8. Measures R.M. Laser remote sensing. Fundamentals and applications. Krieger Publishing Company. Malabar. Florida. 1992. 510 p.
9. Photosensor modules H10720/H10721 series. Hamamatsu: веб-сайт. Режим доступа: http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/alpha/C/3044/H10721-210/index.html (дата обращения 20.06.2016).
10. Si APD S8664 series. Hamamatsu: веб-сайт. Режим доступа: http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/category/3100/4003/4110/S8664-02K/index.html (дата обращения 20.06.2016).
11. Nir-photomultiplier tubes and their applications. Hamamatsu: веб-сайт. Режим доступа: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/NIR-PMT_APPLI_TPMO1040E.pdf (дата обращения 20.06.2016).
12. InGaAs APD G8931-20. Hamamatsu: веб-сайт. Режим доступа: http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4003/4111/G8931-20/index.html (дата обращения 20.06.2016).
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.

Science&Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0408

Science and Education of the Bauman MSTU, 2016, no. 09, pp. 24–34.

DOI: **10.7463/0916.0845030**

Received: 11.08.2016
Revised: 25.08.2016

Comparative Signal-to-Noise Ratio Assessment for the Atmospheric Sounder Lidars with Eye-Safe Laser Wavelengths

P.A. Filimonov[1], S.E. Ivanov[1], M.L. Belov[1,*], V.A. Gorodnichev[1], A.V. Kuvshinov[1]

[*]belov@bmstu.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: lidar, eye-safe laser wavelengths, signal-to-noise ratio

To date, developed and created new laser systems (location, range finding, altimetry, etc.) use (for ensuring eye safeness) the infrared (> 1.4 mm) range. At the same time, an ultraviolet range is of interest too. The most promising, here, is a wavelength of 0.355μm (the third harmonic of a YAG laser: Nd^{+3}), since the atmospheric ozone absorption is still low (in the spectral range of 0.25 - 0.38 mm, ozone absorption increases with decreasing wavelength).

The paper analyses the effectiveness of used eye-safe laser wavelengths of 0.355 and 1.54 μm in the ultraviolet and near infrared spectral ranges to solve the problem of remote sounding of the atmosphere in terms of signal-to-noise ratio.

The signal-to-noise ratio, for a task of remote sounding of the atmosphere ground layer at the eye-safe laser wavelengths of 0.355 and 1.54 μm in the ultraviolet and near infrared spectral ranges, is evaluated with radiation detected both by the photomultiplier tubes and by the avalanche photodiodes (with the best sensitivity characteristics for respective 0.355 and 1.54 μm wavelengths).

The paper presents the calculation results of the signal to noise ratio as a function of distance "lidar - scattering volume of the atmosphere" in several cases: taking into account all the noise; taking into account all the noise, but no shot noise caused by the signal itself; taking into account all the noise, but no shot noise caused by the background (due to scattering of sunlight on atmospheric aerosol) radiation; taking into account all the noise, but ignoring the dark current of the photo-detector; taking into account all the noise, but ignoring the thermal noise (Johnson noise) because of the equivalent load resistance of the output circuit.

It is shown that at small distances "lidar - scattering volume of the atmosphere," the main component of noise is shot noise caused by the signal itself.

At a wavelength of 0.355 μm for the avalanche photodiode the signal to noise ratio is rather better than for the photomultiplier tube (due to slightly better spectral sensitivity at a wavelength of 0.355 μm).

At a wavelength of 1.54μm the calculation results show already a substantial (almost an order of magnitude) advantage of the avalanche photodiode in the value of the signal-to-noise ratio.

In general, one can see a distinct advantage in the value of the signal-to-noise ratio for sounding wavelength of 0.35 μm. Moreover, this advantage grows with increasing distance "lidar - atmospheric scattering volume", and at a distance of 4 km the signal-noise value at a sounding wavelength of 0.355 μm is twice the signal-noise value available at a wavelength of 1.54 μm.

References

1. Pal S., Behrendt A., Radlach M., Schaberl T., Wulfmeyer V. *Eye-safe scanning aerosol lidar at 355 nm*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/271842779_Conference_Pal_et_al_ILRC_2006 (accessed 20.06.2016).
2. Razenkov I.A. Aerosol lidar for continuous atmospheric measurements. *Optika atmosfery i okeana*, 2013, vol. 26, no. 1, pp. 52-63. (in Russian). (English version of journal: *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, vol. 26, no. 4, pp. 308–319. DOI: 10.1134/S1024856013040118)
3. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoy lazernoy lokatsii* [Principles of laser location]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 572 p. (in Russian).
4. GOST 31581-2012. *Lazernaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya bezopasnosti pri razrabotke i ekspluatatsii lazernykh izdeliy* [Laser safety. General safety requirements for development and application of laser products]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 20 p. (in Russian).
5. 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. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 1, pp. 114-128. (in Russian). DOI: 10.7463/0115.0754084
6. Ivanov S.E., Filimonov P.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Mikhaylovskaya M.B. Comparative analysis of wind correlation lidar sounding range in UV, visible band and near IR bands. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 2, pp. 220-232. (in Russian). DOI: 10.7463/0214.0696580
7. Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kravtsov D.A., Cherpakova A.A. Choice of Eye-Safe Radiation Wavelength in UV and Near IR Spectral Bands for Remote Sensing. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2016, no. 2, pp. 105-122. (in Russian). DOI: 10.7463/0216.0832497
8. Measures R.M. *Laser remote sensing. Fundamentals and applications*. Krieger Publishing Company. Malabar. Florida. 1992. 510 p.

9. *Photosensor modules H10720/H10721 series*. Hamamatsu: website. Available at: http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/alpha/C/3044/H10721-210/index.html (accessed 20.06.2016).
10. Si APD S8664 series. Hamamatsu: website. Available at: http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/category/3100/4003/4110/S8664-02K/index.html (accessed 20.06.2016).
11. *Nir-photomultiplier tubes and their applications*. Hamamatsu: website. Available at: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/NIR-PMT_APPLI_TPMO1040E.pdf (accessed 20.06.2016).
12. *InGaAs APD G8931-20*. Hamamatsu: website. Available at: http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4003/4111/G8931-20/index.html (accessed 20.06.2016).
13. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Raschet yarkosti fona i oslableniya lazernogo izlucheniya v ul'trafioletovoy oblasti spektra* [Background brightness and laser radiation attenuation calculation in UV-spectrum]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 66 p. (in Russian).