

УДК 551.501

## **Оценка энергетических характеристик ветрового лидара в ультрафиолетовой области спектра**

*Филимонов П.А., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научный руководитель: Белов М.Л., д.т.н. профессор  
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*[belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)*

### **Введение**

Среди всех известных методов мониторинга атмосферы несомненным преимуществом обладают методы активного дистанционного зондирования с использованием лазерных источников излучения. Методы лазерного зондирования обеспечивают получение профилей или полей параметров атмосферы с исключительно высоким временным и пространственным разрешением (см., например, [1-6]). Причем, в оптическом диапазоне из-за малости длин волн отражателями лазерного сигнала являются все молекулярные и аэрозольные составляющие атмосферы, т.е. сама атмосфера формирует лидарный эхо-сигнал со всей трассы зондирования.

Ветровые лидары предназначены для оперативного дистанционного анализа перемещений атмосферного аэрозоля, облачных образований и измерения скорости атмосферного ветра на основе результатов этого анализа.

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, например, ультрафиолетовый (УФ) диапазон.

Практический интерес для лазерных систем локации и видения имеет ближняя УФ область 0,2 – 0,4 мкм. Этот интерес к ультрафиолетовой области спектра вызван резким уменьшением в УФ диапазоне фонового излучения (см. рисунок 1 [7]).

На рисунке 1 показана спектральная зависимость яркости безоблачного неба (создаваемая рассеянной в атмосфере солнечной радиацией) на уровне моря для зенитного угла Солнца  $45^\circ$  при большой метеорологической дальности видимости (при большой прозрачности земной атмосферы).

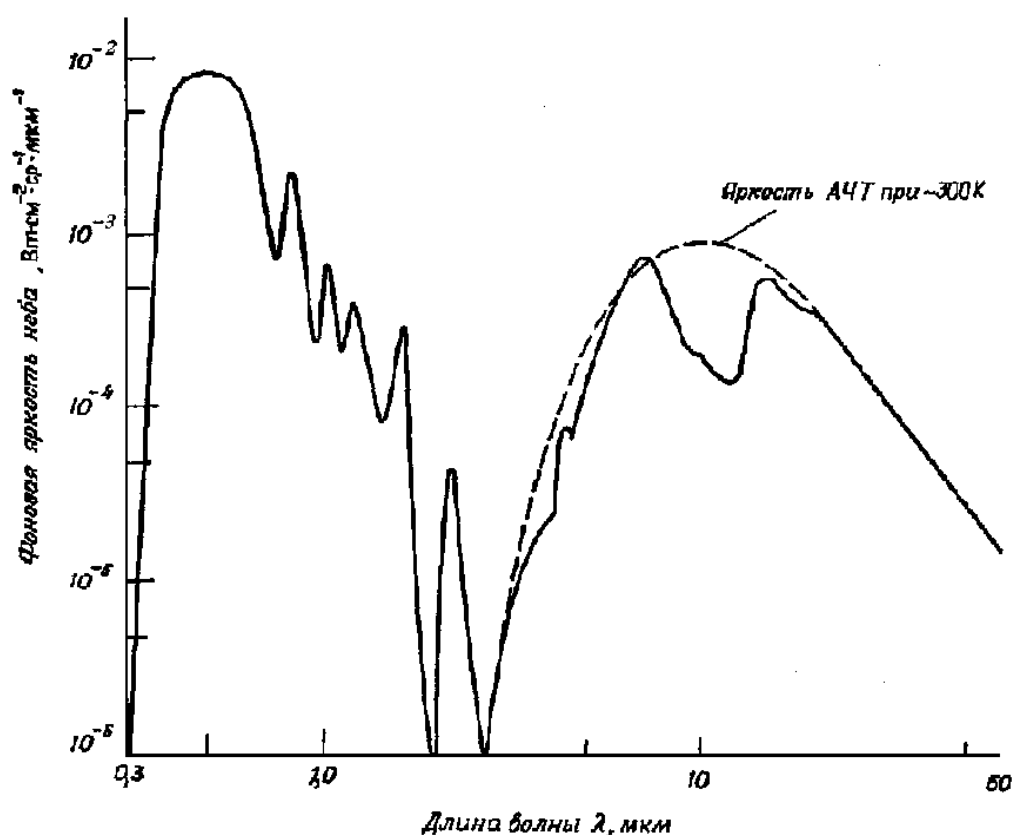


Рис. 1. Спектральная зависимость яркости безоблачного неба

Из рисунка 1 видно, что в ультрафиолетовом диапазоне (на длинах волн близких к длине волны 0,3 мкм) яркость фонового излучения резко падает. Причиной этого является поглощение ультрафиолетового излучения озоновым слоем Земли.

Однако, несмотря на сильное поглощение атмосферным озоном в ультрафиолетовой области спектра, эта спектральная область все же представляет интерес для лазерных систем локации и видения. Дело в том, что поглощение атмосферным

озоном ультрафиолетового излучения происходит в основном в верхних слоях земной атмосферы.

На рисунке 2 [8] показано распределение количества атмосферного озона с высотой над уровнем моря. Как видно из рисунка в тропосфере до высот  $\sim 10$  км концентрация озона мала. В стратосфере же содержание его резко увеличивается, достигая пикового значения, а затем быстро уменьшается. Когда говорят об озоновом слое, то обычно понимают область его максимальной концентрации (находящуюся в стратосфере).

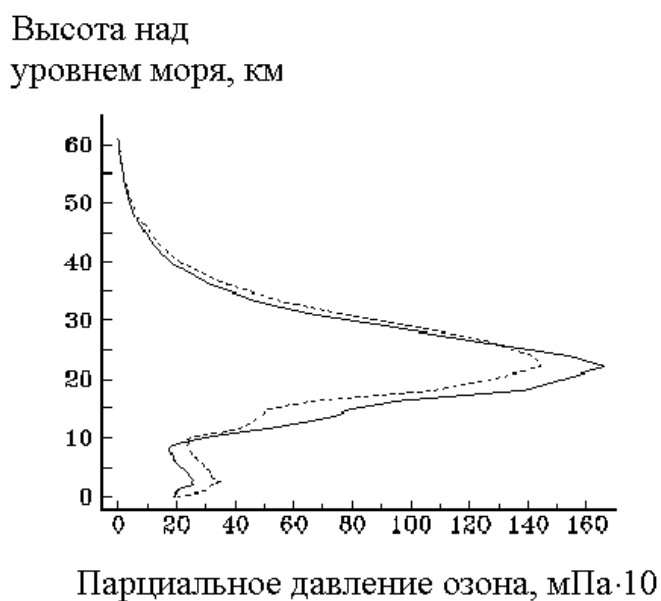


Рис. 2. Высотное распределение атмосферного озона

Данная статья посвящена оценке дальности зондирования ветрового корреляционного лидара в приземном слое земной атмосферы в УФ спектральном диапазоне.

### 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;

$\tau_u$  – 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»;

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

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

$\epsilon(z)$  – 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);

$\alpha_r, \alpha_t$  – 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 и видимом 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 [9].

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

где

$\mu$  - отношение сигнал/шум;

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

$(1+B) \approx 2.5$ ;

$\Delta f$  – 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 [10]

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

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 и видимой областях спектра является солнечное излучение, рассеянное земной атмосферой. Расчет яркости солнечного излучения, рассеянного земной атмосферой, представляет собой сложную задачу [10].

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 [10]

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

где

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

$\lambda_s$  - отношение показателя рассеяния аэрозольной земной атмосферы к показателю ослабления;

$\pi S_\lambda$  - спектральная солнечная постоянная на длине волны  $\lambda$ ;

$\tau_o, \tau$  - оптическая толщина всей земной атмосферы и оптическая толщина земной атмосферы между подстилающей поверхностью и приемником (в вертикальном направлении);

$\theta, \varphi$  - зенитный угол и азимут направления наблюдения;

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

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

$\gamma$  - угол рассеяния.

Ниже проводится оценка дальности зондирования ветрового корреляционного лидара, работающего на длинах волн 0,355 мкм (УФ диапазон) и 0,532 мкм (видимый диапазон).

## Математическое моделирование

Априорная неочевидность результатов сравнительного анализа дальности зондирования ветрового корреляционного лидара в УФ и видимом спектральных диапазонах связана с тем, что параметры атмосферы (показатель аэрозольного ослабления, показатель поглощения озоном, оптическая толща 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.

Используемые в работе параметры лазерных источников, приемников излучения, оптические характеристики атмосферы (для приземной трассы) и фонового солнечного излучения приведены в табл. 1 [10-14].

Таблица 1

Характеристики лазеров, ФЭУ, атмосферы и фонового излучения

|                                                            |                      |                      |
|------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Длина волны, мкм                                           | 0,532                | 0,355                |
| Энергия в импульсе, мДж                                    | 175                  | 70                   |
| Длительность импульса, нс                                  | 5 - 7                | 5 - 7                |
| Спектральная чувствительность, мА/Вт                       | 80                   | 70                   |
| Темновой ток, А                                            | $4 \cdot 10^{-15}$   | $10^{-16}$           |
| Фоновый ток, А                                             | $2,2 \cdot 10^{-10}$ | $5,5 \cdot 10^{-11}$ |
| Показатель аэрозольного рассеяния, $\text{м}^{-1}$         | $4,1 \cdot 10^{-4}$  | $6,79 \cdot 10^{-4}$ |
| Оптическая толща земной атмосферы, отн.ед.                 | 0,405                | 0,9155               |
| Спектральная солнечная постоянная, $\text{Вт/см}^2$<br>мкм | 0,195                | 0,116                |

На рисунках 3,4 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 0,355 и 0,532 мкм.

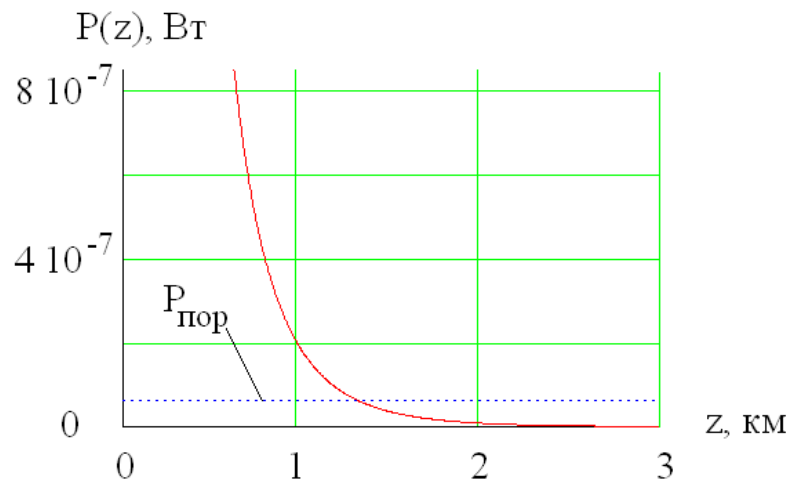


Рис. 3. Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 0,355 мкм

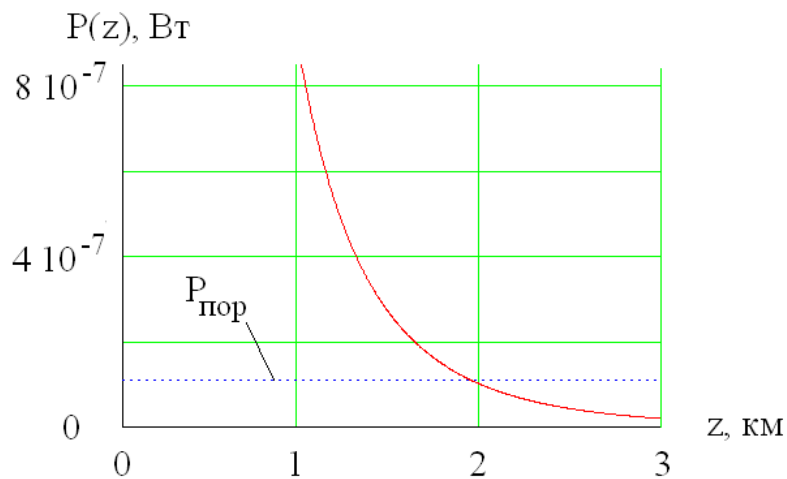


Рис. 4. Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 0,532 мкм

Расчеты проводились для горизонтальной трассы зондирования при метеорологической дальности видимости 10 км, безоблачной атмосфере и зенитном угле Солнца  $45^\circ$ . 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 толщ  $\tau_o$ ,  $\tau$  состоят из суммы аэрозольной и молекулярной компонент и оптической толщи поглощения атмосферного озона, а индикатриса  $\chi(\gamma)$  рассеяния атмосферы состоит из взвешенной суммы аэрозольной и молекулярной составляющих [8,13].

Предельные дальности зондирования, которые оценивались из условия равенства мощности  $P(z)$  полезного сигнала и пороговой мощности приемника  $P_{\text{пд}}$ , для длин волн 0,355 и 0,532 соответственно равны 1335 и 1955 м.

Таким образом, при переходе в УФ диапазон дальность зондирования заметно уменьшается (при выбранных для расчета параметров – в полтора раза). Это обусловлено тем, что 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), а также различием характеристик лазерных источников и приемников в видимом и ближний ИК диапазонах.

## Заключение

Результаты расчетов показывают, что при переходе в УФ диапазон дальность зондирования ветрового лидара заметно уменьшается (при выбранных для расчета параметров – в полтора раза). Это обусловлено тем, что при переходе в УФ диапазон увеличивается ослабление атмосферы (в основном из-за поглощения озоном), а также различием характеристик лазерных источников и приемников в видимом и ближний ИК диапазонах.

## Список литературы

1. 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.
2. Орлов В.М., Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В., Юрга Н.И., Белов М.Л., Овчаренко А.Ф. Применение корреляционных методов в атмосферной оптике. 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. Банах В.А., Брюер А., Пичугина Е.Л., Смалихо И.Н. Измерения скорости и направления ветра когерентным доплеровским лидаром в условиях слабого эхосигнала // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 5. С. 333-340.
  5. Матвиенко Г.Г., Банах В.А., Бобровников С.М., Бурлаков В.Д., Веретенников В.В., Кауль Б.В., Креков Г.М., Маричев В.Н. Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 10. С. 915-924.
  6. Савин А.В., Коняев М.А. Доплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов // Метеоспектр. 2008. № 1. С. 147-152.
  7. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
  8. Поглощение света атмосферным азотом. Режим доступа: <http://www.astronet.ru/db/msg/1169494/node29.html> (дата обращения 20.03.2014).
  9. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В.Стрелков. М.: Изд-во МГТУ, 2002. Издание 2-е дополненное. 528 с.
  10. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В.Стрелков. М.: Изд-во МГТУ, 2010. Издание 2-е дополненное. 572 с.
  11. Compact high energy, high frequency pulsed Nd:YAG lasers. Режим доступа: [http://www.litronlasers.com/pdf%20files/LitronNanoTRL\\_0105\\_2.pdf](http://www.litronlasers.com/pdf%20files/LitronNanoTRL_0105_2.pdf) (дата обращения 20.12.2013)
  12. 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).
  13. <http://jp.hamamatsu.com/resources/products/>.
  14. 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.