электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 621.375

Сравнительный анализ дальности лазерной локации в видимом и ультрафиолетовом спектральных диапазонах

***Пашенина О. Е.**, 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
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»
belov@bmstu.ru

Введение

Лазерные системы локации и видения предназначены для решения широкого круга задач – для обнаружения и определения местоположения различных объектов, высокоточного измерения дальности или высоты над земной поверхностью, параметров движения объектов, дистанционного определения параметров атмосферы и гидросферы, дистанционного наблюдения объектов в условиях недостаточной естественной освещенности и т.п. В настоящее время лазерные системы локации и видения используются в геодезии и метеорологии, авиационной и космической технике, системах дистанционного зондирования, робототехнических системах и других областях науки и техники.

На сегодняшний день практически все существующие лазерные системы локации и видения (за редким исключением, связанным со спецификой конкретных задач) работают в видимом, ближнем или среднем инфракрасных диапазонах длин волн.

В последнее время появился интерес к системам, работающим в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн, которые используют другую спектральную информацию (коэффициенты отражения или излучения в УФ диапазоне) об объектах локации, чем лазерные системы в видимом, ближнем или среднем инфракрасных диапазонах.

При этом вопрос заключается не только в получении дополнительной (в другом спектральном диапазоне) информации об объектах локации. Очень важным является и вопрос о безопасности (прежде всего для глаз) используемых лазерных систем.

Использование лазерных приборов всегда связано с определенной опасностью для человека. Основное вредное воздействие лазерное излучение оказывает на сетчатку глаза,

причем хрусталик (и глазное яблоко), действуя как дополнительная фокусирующая оптика, существенно повышает концентрацию энергии на сетчатке. Диапазон длин волн вредного воздействия на сетчатку глаза составляет от 0,38 до 1,4 мкм. Основное воздействие при импульсном излучении оказывает тепловое разрушение сетчатки. Длительное воздействие излучения на сетчатку глаза приводит, в основном, к фотохимическим процессам ее разрушения.

Лазерное излучение с длинами волн 0,308—0,38 мкм и свыше 1,4 мкм воздействует на передние среды глаза и является более безопасным, чем лазерное излучение с длинами волн 0,38—1,4 мкм.

1. Постановка задачи

Ультрафиолетовое излучение – это невидимое глазом электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между видимым и рентгеновским излучениями в пределах длин волн 0,01—0,4 мкм. Вся ультрафиолетовая область спектра условно делится на ближнюю (0,2—0,4 мкм) и далёкую или вакуумную (0,01—0,2 мкм) спектральные области. При этом излучение с длиной волны $\lambda < 0{,}3$ мкм в естественных условиях земной атмосферы вообще отсутствует.

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, что иллюстрирует рисунок 1.

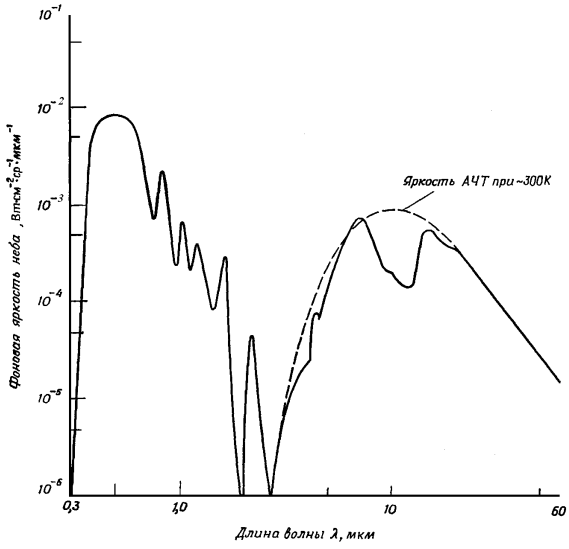

Рис. 1. Спектральная зависимость яркости безоблачного неба

На рисунке 1 показана спектральная зависимость фоновой яркости безоблачного неба (создаваемая рассеянной в атмосфере солнечной радиацией) на уровне моря для зенитного угла Солнца 45° при большой метеорологической дальности видимости в атмосфере.

Из рисунка 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 озонным слоем Земли.

При изменении длины волны от 0,5 мкм (видимый диапазон) до 0,3 мкм (УФ диапазон) суммарная оптическая толща земной атмосферы увеличивается более чем в 10 раз, что показываю данные в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Спектральная зависимость суммарной оптической толщи $\tau_{\Sigma}(\lambda)$ всей земной атмосферы (в вертикальном направлении)

Длина волны, мкм	$\tau_{\Sigma}(\lambda)$
0,30	4,968
0,32	1,551
0,34	1,046
0,36	0,872
0,38	0,744
0,40	0,619
0,45	0,455
0,5	0,370

Однако, несмотря на сильное поглощение атмосферным озоном в ультрафиолетовой области спектра, эта 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 атмосферы, что показано на рисунке 2.

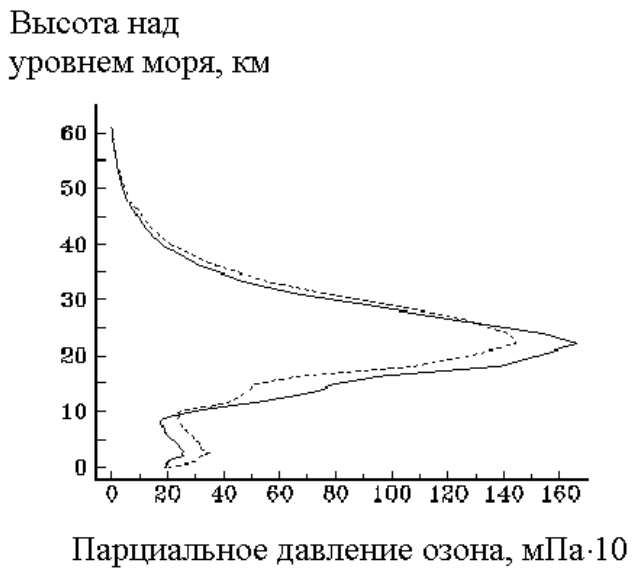

Рис. 2. Высотное распределение атмосферного озона

На рисунке 2 представлено распределение атмосферного озона с высотой над уровнем моря. Как видно из рисунка, в тропосфере на высотах до 10 км концентрация озона мала. В стратосфере же содержание его резко увеличивается, достигая пикового значения, а затем быстро уменьшается. Когда говорят об озонном слое, то обычно понимают область его максимальной концентрации (находящуюся в стратосфере). В тропосфере (где работает большинство лазерных систем локации и видения) находится всего около 8 % общего содержания озона в атмосфере.

Таким образом, в тропосфере содержание озона не велико и здесь возможна практическая реализация лазерных систем локации и видения.

Однако вопрос о выборе наилучшего варианта лазерной системы локации и видения УФ диапазона и его преимущества по сравнения с системами в видимом диапазоне не ясен, так как атмосферные характеристики (молекулярное и аэрозольное рассеяние, поглощение атмосферными газами) и коэффициенты отражения земных поверхностей сильно зависят от длины волны.

2. Анализ спектральной зависимости атмосферного ослабления в ультрафиолетовой области спектра

Одним из основных факторов, существенно влияющих на величину принимаемой мощности лазерного локационного сигнала, является пропускание земной атмосферы.

Ослабление лазерного излучения в земной атмосфере в УФ спектральном диапазоне происходит за счет селективного поглощения газовыми компонентами, молекулярного (релеевского) рассеяния и аэрозольного рассеяния.

Основной вклад в молекулярное поглощение в УФ диапазоне вносят озон и кислород. Кислород имеет интенсивные полосы поглощения в УФ областях 0,17—0,19 мкм и 0,24—0,26 мкм, причем последняя область переходит в континуум, простирающийся в сторону коротких волн до 0,2 мкм. Озон сильно поглощает в УФ диапазоне излучение с длиной волны короче 0,32 мкм.

На рисунке 3 показана спектральная зависимость суммарного показателя ослабления излучения α (вследствие как молекулярного рассеяния, так и молекулярного поглощения) в приземной чистой атмосфере при метеорологической дальности видимости 100 км (совершенно чистый воздух по Международной шкале видимости – т.е. в отсутствие аэрозольного рассеяния) в диапазоне 0,2—0,55 мкм.

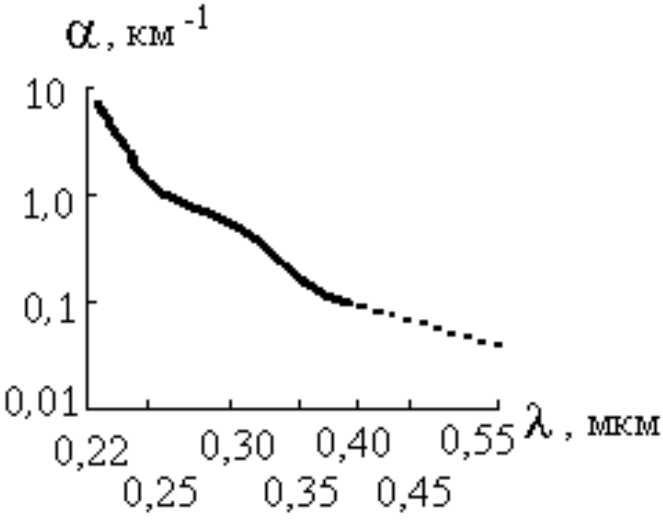

Рис. 3. Зависимость показателя ослабления излучения вследствие молекулярного рассеяния и поглощения

Из рисунка 3 видно, что суммарный показатель ослабления (вследствие как молекулярного рассеяния, так и молекулярного поглощения) сильно возрастает в УФ диапазоне с уменьшением длины волны излучения.

Влияние аэрозольного рассеяния на распространение излучения в УФ диапазоне иллюстрирует рисунок 4. Здесь показаны результаты расчетов спектральной зависимости

пропускания T_a аэрозольной атмосферы. Белые кружки – континентальная дымка, черно-белые кружки – морская дымка.

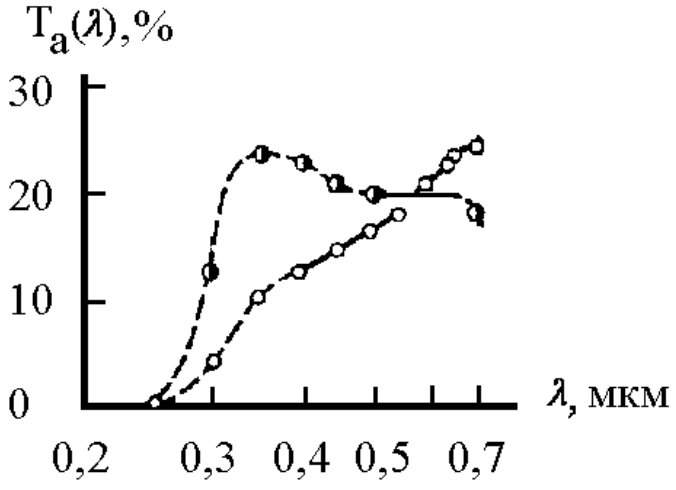

Рис. 4. Пропускание аэрозольной атмосферы

Из рисунка 4 видно, что пропускание аэрозольной атмосферы при уменьшении длины волны излучения существенно уменьшается (т.е. показатель аэрозольного ослабления существенно увеличивается) для континентальной дыми во всем УФ диапазоне, а для морской дымки – начиная с длины волны ~ 0,35 мкм.

3. Анализ спектральной зависимости коэффициентов отражения земной поверхности в ультрафиолетовой области спектра

Еще одним фактором, существенно влияющих на величину принимаемой мощности лазерного локационного сигнала, является коэффициент отражения (альбедо) земной поверхности.

В настоящее время существуют несколько спектральных библиотек с данными о коэффициентах отражения в ультрафиолетовой, видимой, ближней и средней инфракрасной областях. Спектральные библиотеки представляют собой наборы графиков-кривых спектральной отражательной способности объектов, полученные многоканальными спектрометрами в полевых или лабораторных условиях. В работе были использованы данные спектральной библиотеки USGS DigitalSpectralLibrary (версия splib06a - сентябрь, 2007). Библиотека USGS SpectroscopyLab’s содержит данные о спектральной отражательной способности минералов, горных пород, грунтов, жидкостей, растительности, искусственных материалов в диапазоне от 0,2 до 150 микрометров. Всего в библиотеке более 1300 спектральных кривых.

На рисунке 5 приведены коэффициенты отражения некоторых минералов, горных пород, грунтов, жидкостей, растительности, металлов для разных длин волн.

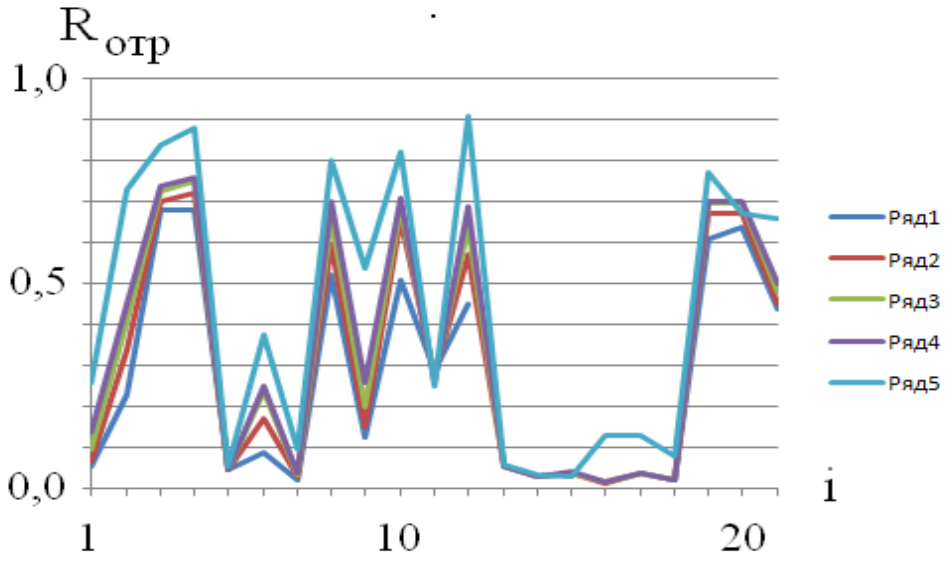

Рис. 5. Коэффициенты отражения для разных длин волн

На рисунке 5 ряд 1 соответствует длине волны 0,266 мкм (четвертая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом), ряд 2 – 0,308 мкм (эксимерный XeCl лазер), ряд 3 – 0,337 мкм (азотный лазер), ряд 4 – 0,355 мкм (третья гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом), ряд 5 – 0,532 мкм (вторая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом). По оси абсцисс отложены номера i объектов, а по оси ординат – соответствующие им коэффициенты отражения. Нумерация объектов отражения: 1 - железный гранат; 2 - квасцовый камень; 3 - безводный гипс; 4 - известковый шпат; 5 - красный железняк; 6 – нефрит; 7 - железный колчедан; 8 – кварц; 9 – тальк; 10 – кальцит + доломит; 11 – красный железняк + кварц; 12 - карбонат магния; 13 - красная железная руда, тонкая плёнка; 14 – морская вода, прибрежная зона; 15 – морская вода, открытый океан; 16 – зеленая сухая трава; 17 – зеленые листья орехового дерева; 18 – газонная трава; 19 – алюминий; 20 – хром; 21 – никель.

Из рисунка 5 хорошо видно, что наибольшие значения коэффициентов отражения реализуются в видимом диапазоне на длине волны 0,532 мкм, а в ультрафиолетовом диапазоне (для используемых на рисунке лазерных длинах волн) - на длине волны 0,355 мкм. На этих же длинах волн реализуются, как правило, и наибольшие контрасты коэффициента отражения между объектами отражения.

4. Определение дальности лазерной локации

Дальность лазерной локации можно оценить из условия равенства (для предельной дальности локации) мощности полезного лазерного локационного сигнала (приходящего на приемник) и пороговой мощности приемника локатора.

Наиболее используемой в теории лазерной локации моделью объекта локации, является плоский ламбертовский отражатель. При локации ламбертовского отражателя излучаемый источником импульс гауссовской формы искажается и описывается сложной функцией, содержащей интеграл Френеля (это связано с ограниченным размером отражателя).

Если искажением формы локационного импульса можно пренебречь (это можно сделать, когда протяженность импульса источника $c\tau_и$ много больше величины $\frac{R_н^2}{L}$, где $R_н$ – размер освещенного лазерного пятна на поверхности), то форма локационного импульса становится гауссовой, а его длительность остается равной длительности импульса источника $\tau_и$. Тогда выражение для мощности лазерного локационного сигнала при импульсной локации ламбертовского отражателя принимает вид

$$P(t) \cong P_н f(t) \qquad (4.1),$$

$$P_н = \frac{a_t a_r A}{L^4 C_o};\ C_o = C_t + C_r + \frac{1}{r_o^2};\ f(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left\{-\frac{4(t')^2}{\tau_и^2}\right\};\ t' = t - \frac{2L}{c};$$

$P_н$ – мощность, регистрируемая приемником при непрерывном облучении ламбертовского отражателя;

$R_{отр}$ – коэффициент отражения (альбедо) ламбертовского отражателя;

$a_{t,r}, C_{t,r}$ – величины, зависящие от параметров источника и приемника лазерного локатора;

c – скорость света;

$\tau_и$ – длительность импульса лазерного источника;

L – расстояние от лазерного локатора до объекта локации.

Зависимость величины лазерного локационного сигнала $P_н$ от расстояния L до отражателя имеет принципиально разный характер при большом и малом размере отражателя. Если эффективный размер отражателя r_o много больше размера лазерного пятна подсвета и поля обзора приемника в плоскости отражателя, то формула для мощности $P_н$ лазерного локационного сигнала имеет вид

$$P_н = \frac{b_t b_r R_{отр}}{L^2(\alpha_t^{-2} + \alpha_r^{-2})} \qquad (4.2),$$

где

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

Величины $b_{t,r}$ в общем случае сложным образом зависят от параметров источника и приемника лазерного локатора. Однако в некоторых частных случаях для них могут быть получены простые соотношения. Например, для локации в прозрачной аэрозольной атмосфере величины $a_{t,r}$ определяются выражениями

$$b_t = \frac{P_o K_t T_t}{\pi \alpha_t^2}, \; b_r = \pi r_r^2 K_r T_r,$$

где

P_o – мощность излучения лазерного источника;

r_r – радиус приемного объектива;

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

T_t, T_r –коэффициенты пропускания атмосферы на трассе «лазерный локатор – объект локации» и «объект локации - лазерный локатор».

На горизонтальной трассе в однородной атмосфере для моностатической локации имеем

$$T_t = T_r = \exp\{L(\varepsilon + k)\},$$

ε – показатель, учитывающий аэрозольное ослабление и молекулярное рассеяние;

k – показатель поглощения атмосферными газами (озоном в УФ диапазоне).

Прием лазерного локационного сигнала всегда производится на фоне шумов, которые ограничивают потенциальные возможности лазерного локатора. В качестве фотодетектора в лазерных локационных системах часто выбирается фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), т.к. он обладает большой чувствительностью и небольшими собственными шумами.

Пороговая мощность ФЭУ при наличии фонового излучения определяется формулой

$$P_{пор} = \frac{\mu[2e(I_t + I_b)(1+B)\Delta f]^{\frac{1}{2}}}{S_k} \qquad (4.3),$$

где

μ -отношение сигнал/шум;

$e=1,6\cdot10^{-19}$ А·с – заряд электрона; $(1+B)\cong2,5$;

Δf – эффективная полоса частот фотоприемного устройства;

S_k – спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ;

I_t – темновой ток фотокатода;

I_b – среднее значение тока, обусловленного фоновой засветкой.

Для приемника лидара с узким полем зрения и узкополосным спектральным фильтром выражение для I_b имеет вид

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

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 инфракрасной областях спектра является солнечное излучение, рассеянное земной атмосферой.

При высокой прозрачности атмосферы (оптическая толща всей земной атмосферы $\leq 0,2$) результаты близкие к реальным, могут быть получены в аналитическом виде для плоскопараллельной модели атмосферы в приближении однократного рассеяния. Выражение для яркости L_b фонового солнечного излучения, приходящего на приемник, зависит от геометрической схемы зондирования. В частном случае зондирования в горизонтальном направлении величина L_b равна

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

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;

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 проводятся результаты математического моделирования и сравнительный анализ дальности обнаружения лазерного локатора, работающего на длинах волн 266, 308, 355 нм (УФ диапазон) и 532 нм (видимый диапазон).

5. Математическое моделирование

При математическом моделировании использовались следующие длины волн излучения лазерных источников:

- УФ диапазон: 266 нм (четвертая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом), 308 нм (эксимерный лазер на XeCl), 355 нм (третья гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом);

- видимый диапазон: 532 нм (вторая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом).

Расчеты проводились для горизонтальной трассы зондирования при метеорологической дальности видимости 10 км, безоблачной атмосфере и зенитном угле Солнца 45°. Энергия в импульсе для всех лазеров задавалась равной 10 мДж, а длительность импульса лазера – 10 нс. Угол расходимости излучения лазерного локатора 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 0,1 м и 1 нм, а отношение сигнал/шум – 10. Альбедо поверхности принималось равным 0,1 для всех длин волн локации.

При расчете по формуле (4.3) 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.

На рисунках 6 – 9 приведены полученные по формулам (4.2), (4.3) зависимости мощности $P(z)$ полезного сигнала и пороговой мощности $P_{пор}$ от дальности локации z для лазерных длин волн 266, 308, 355 и 532 нм.

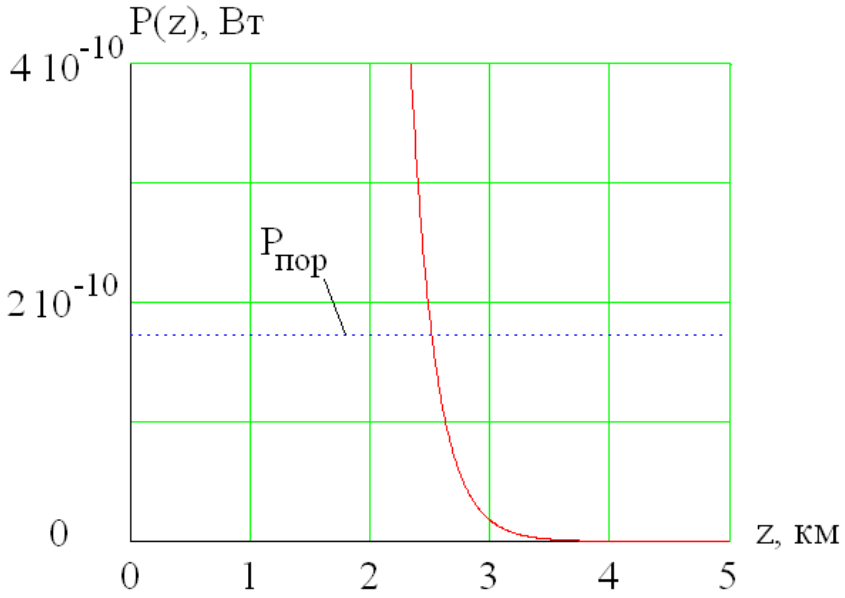

Рис. 6. Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности локации для длины волны 266 нм

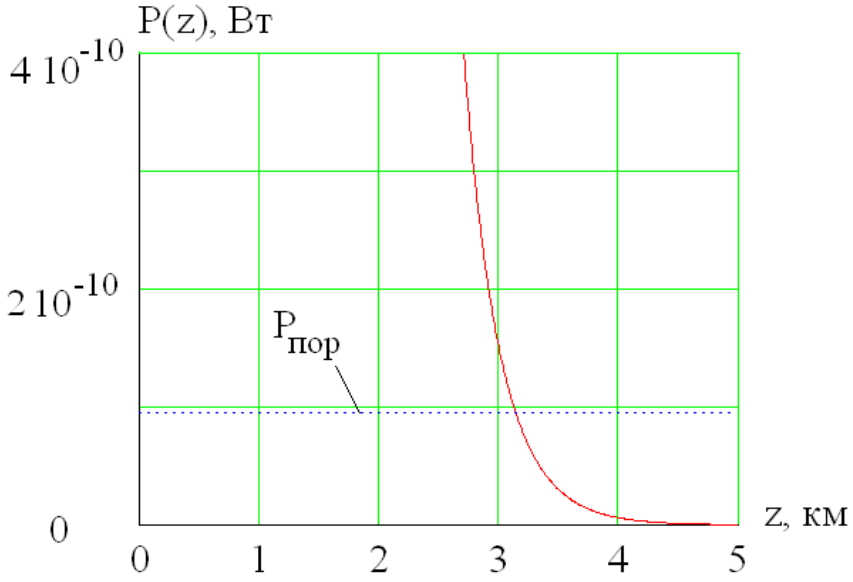

Рис. 7. Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности локации для длины волны 308 нм

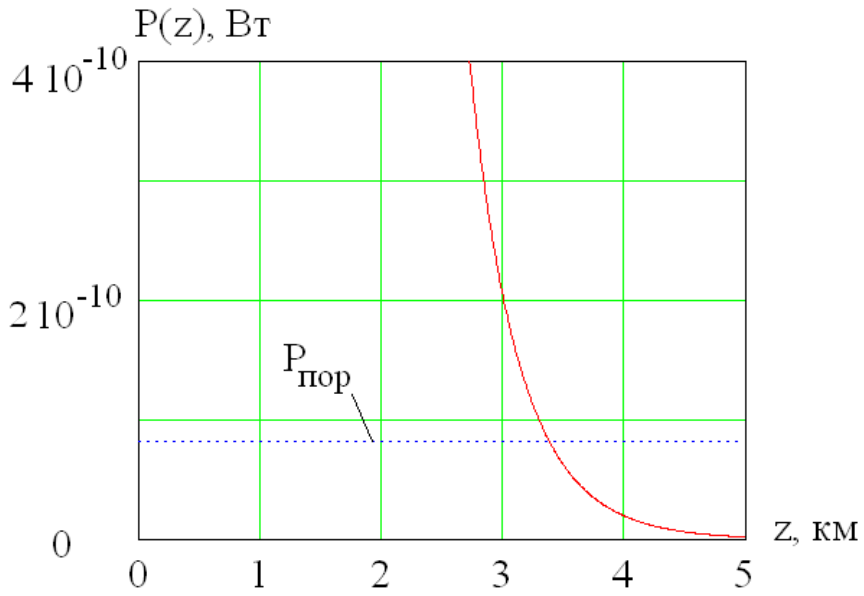

Рис. 8. Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности локации для длины волны 355 нм

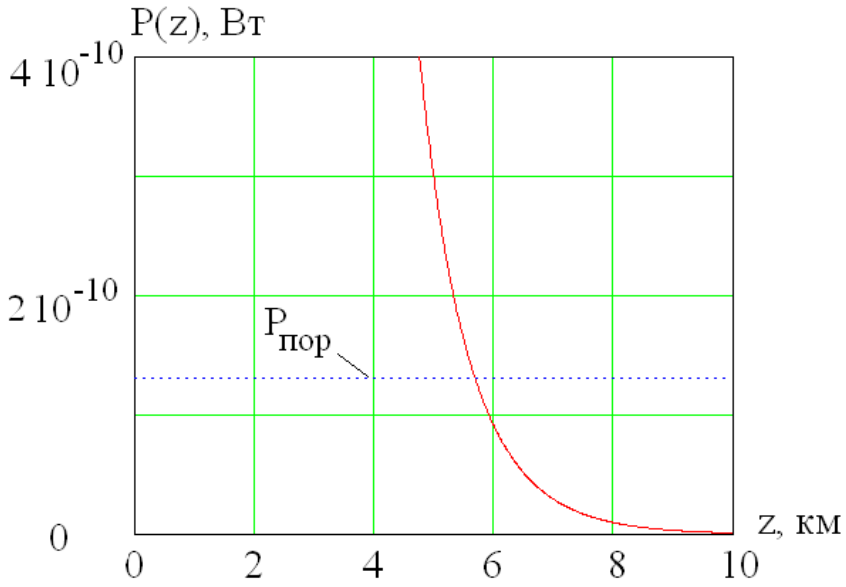

Рис. 9. Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности локации я для длины волны 532 нм

Предельные дальности локации оценивались из условия равенства мощности $P(z)$ полезного сигнала и пороговой мощности приемника $P_{пор}$. Для длин волн 266, 308, 355 и 532 нм предельные дальности локации приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Предельные дальности локации

λ, нм	266	308	355	532
Предельная дальность локации, м	2510	3310	3380	5690

Из результатов, приведенных в таблице 5.1, видно, что для длин волн 266, 308 и 355 нм (УФ диапазон) и 532 нм (видимый диапазон) для горизонтальной трассы в земной атмосфере при выбранных значениях параметров предельная дальность локации лежит в диапазоне 2510 – 5690 м.

Максимальная дальность локации соответствует видимому спектральному диапазону. При переходе в УФ диапазон дальность зондирования уменьшается. Это обусловлено тем, что при переходе в УФ диапазон возрастает ослабление атмосферы (в основном из-за поглощения озоном), причем этот эффект сглаживается уменьшением фонового излучения.

Наиболее приемлемой длиной волной локации в УФ диапазоне является 355 нм. Для этой длины волны дальность локации уменьшается (по сравнению с видимым диапазоном 532 нм) в примерно 1,5 раз, однако эта длина волны является гораздо более безопасной для глаз (чем 532 нм).

Уменьшение дальности локации при переходе в ультрафиолетовый диапазон не особенно велико и может быть скомпенсировано изменением параметров передающего или приемного каналов лазерного локатора.

Заключение

Максимальная дальность локации соответствует видимому спектральному диапазону. При переходе в УФ диапазон дальность локации уменьшается. Это обусловлено тем, что при переходе в УФ диапазон возрастает ослабление атмосферы (в основном из-за поглощения озоном), причем этот эффект сглаживается уменьшением фонового излучения. Наиболее приемлемой длиной волной локации в УФ диапазоне является 355 нм. Для этой длины волны дальность локации уменьшается (по сравнению с видимым диапазоном 532 нм) в примерно 1,5 раза, однако эта длина волны является гораздо более безопасной для глаз.

Список литературы

1. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса. М.: Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 230 с.
2. Лабунец Л.В. Цифровые модели изображений целей и реализаций сигналов в оптических локационных системах. М.: МГТУ, 2007. 216 с.
3. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. М.: Из-во МГТУ, 2013. 478 с.
4. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации. 2-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ, 2010. 572 с.
5. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. ГОСТ 31581-2012. М.: Стандартинформ, 2013. 19 с.
6. 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.
7. USGS DigitalSpectralLibrary 06. Available at: http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06, accessed 20.04.2014.