

# ПРОХОЖДЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПРИЗЕМНЫЙ СЛОЙ АТМОСФЕРЫ

*Р. С. Кузин, Е. Н. Макейкин, С. А. Анциферов, А. В. Авдошин, И. В. Гостев,  
А. Ю. Герасимов, В. Н. Михалкин, А. М. Радайкин, А. А. Шадрин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Значительные достижения квантовой электроники позволили создать уникальные по своим характеристикам лазерные системы, которые за счет облучения объекта лазерным излучением (ЛИ) и приема отраженного сигнала позволяют с достаточной точностью обнаружить, определить местонахождение, выполнить слежение и точное сопровождение удаленных объектов на требуемом расстоянии. Однако, несмотря на достигнутые успехи, проблемы эффективности работы таких систем лазерного видения (СЛВ) и вопросы повышения их дальности работы остаются актуальными. Наиболее остро стоят проблемы обеспечения максимально возможной всепогодной работы СЛВ и увеличения максимальной дальности видения.

Выделяют два основных фактора, влияющие на лазерный пучок при прохождении участка атмосферы – это турбулентность и явления поглощения и рассеяния на мельчайших частицах, содержащихся в атмосфере. Наличие таких явлений ограничивает предельную дальность работы систем лазерного видения, позволяющих регистрировать исследуемый объект на дальнем расстоянии. Общий принцип работы СЛВ представлен на рис. 1.

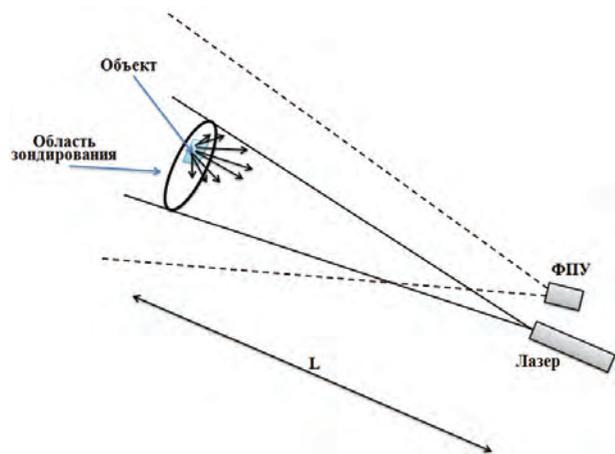


Рис. 1. Общий принцип работы системы лазерного видения

Лазер зондирует область атмосферы, как показано на рисунке. При наличии исследуемого объекта в области на достаточном расстоянии, фотоприемное устройство фиксирует диффузно-отраженный сигнал. Очевидно, что дальность работы такой системы

зависит от коэффициента пропускания лазерного излучения атмосферой и от турбулентности. Рассмотрим их более подробно.

## Метеорологическая оптическая дальность

Метеорологическая оптическая дальность (МОД) – расстояние, на котором лазерное излучение ослабляется до 5 % от своего первоначального значения. Данный параметр принят как основной показатель потерь лазерного излучения при прохождении атмосферной трассы.

В связи с тем, что не существует точной формулы, позволяющей вычислить полное пропускание атмосферы (из-за неоднородности частиц и других параметров, входящих в нее), была модернизирована методика измерения МОД, позволяющая получать экспериментальные значения коэффициента пропускания атмосферы на измерительной трассе в любое время дня и года. Ранее она была разработана Лавровым Л. М. и Горячевым Л. В [2].

Метеорологическая оптическая дальность  $S_{\text{мод}}$  в зависимости от коэффициента пропускания и длины трассы  $\tau$  и  $L$  соответственно, выражается формулой [2]:

$$S_{\text{мод}} = L \frac{\ln(0,05)}{\ln(\tau)}. \quad (1)$$

Ослабление лазерного пучка связано с рассеиванием и поглощением на мельчайших частицах, содержащихся в атмосфере. Рассмотрим более подробно эти явления.

## Рассеяние

Основной вклад в рассеяние вносят мелкие частицы, находящиеся в нижних слоях атмосферы. В воздухе находятся пары воды, капли воды различных размеров, кристаллы льда и частицы пыли. Значительное скопление капелек воды в атмосфере образует дымку, туман и облака. Мельчайшие капли воды, а также частицы мелкой пыли имеют настолько малый вес, что находятся в атмосфере во взвешенном состоянии, не опускаясь на землю. Диаметр таких частиц составляет примерно 0,01–10 мкм. Более крупные капли воды и пыли диаметром 10–100 мкм оседают на землю, но весьма медленно и восходя-

щими потоками воздуха часто вновь поднимаются вверх. Диаметр капель морозящего дождя составляет 100–500 мкм, а крупного дождя 0,5–5 мм. Капли дождя и кристаллы льда почти полностью рассеивают, а частицы пыли отчасти рассеивают и отчасти поглощают падающий на них свет [1].

### Поглощение

Молекулярное поглощение вызвано наличием в атмосфере различных газов. Поглощение играет чрезвычайно важную роль в диапазоне волн 0,3–15 мкм, поскольку здесь сосредоточены наиболее сильные колебательно-вращательные полосы водяного пара и всех других газов. Основной поглощающий газ – водяной пар.

Наиболее сильно излучение поглощается трехатомными молекулами газов: парами воды, углекислым газом и озоном (при отсутствии техногенных примесей и в порядке уменьшения коэффициента поглощения). Озон сконцентрирован в высших слоях атмосферы, поэтому в приземном слое влиянием озона на поглощение можно пренебречь, будем рассматривать только влияние  $H_2O$  и  $CO_2$ . Молекулярное поглощение имеет ярко выраженный селективный характер и проявляется в виде полос поглощения, разделенных областями пропускания, где поглощение либо вообще отсутствует, либо является весьма малым. Такие области спектра называются «окнами прозрачности» атмосферы.

### Экспериментальная схема измерений МОД

Общая схема установки для измерения коэффициента пропускания представлена на рис. 2.

В качестве источника излучения использовались 4 различных генератора лазерного излучения на длинах волн 0,53; 0,63; 1,06; 1,07 мкм. Одновременно в установке использовалось 2 лазера. Плоскопараллельные зеркала 3–4 применялись для внедрения в установку дополнительного генератора лазерного излучения 1. Сферические зеркала 5 и 7 устанавливались в качестве телескопа для расширения пучка и фокусировки приходящего излучения. Делитель 10 необходим для направления доли лазерного пучка на фотоприемные устройства. Собирающие линзы 13 и 14 предназначены для фокусирования лазерных пучков на фоточувствительные площадки ФПУ.

Для минимизации фоновых засветок перед приемниками 11–12 устанавливались узкополосные интерференционные фильтры с рабочими длинами волн 0,53; 0,63; 1,06 и 1,07 мкм, в зависимости от длины волны генерирующего лазерного излучения.

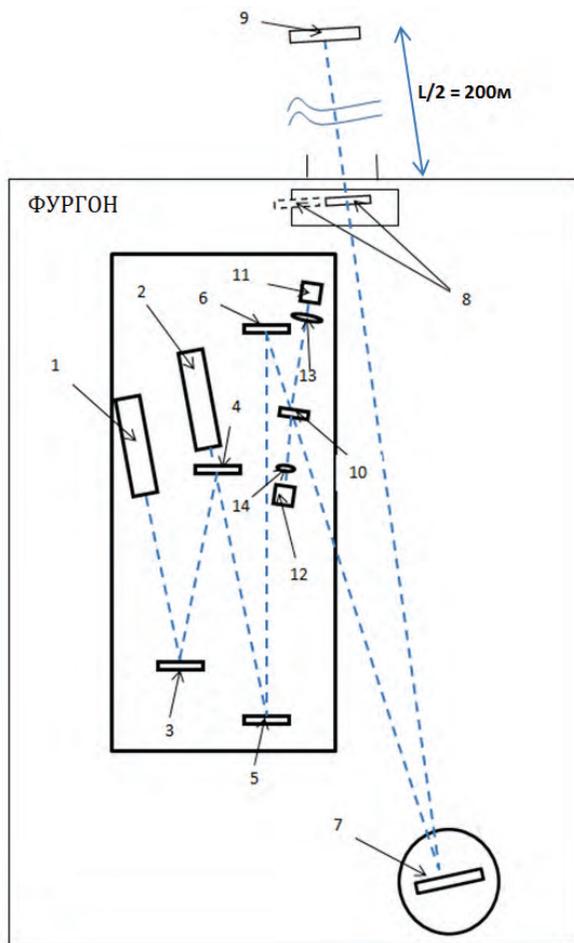


Рис. 2. Общая схема установки для измерения коэффициента пропускания лазерного излучения: 1 – ГЛИ 1; 2 – ГЛИ 2; 3, 8–9 – плоские глухие зеркала; 4 – полупрозрачное зеркало; 5–7 – сферические зеркала; 10 – клин; 11–12 – ФПУ; 13–14 – собирающие линзы

Измерение коэффициента пропускания трассы длиной  $L$  осуществлялось в 2 этапа. Сначала зеркало 8 устанавливается в правое положение для регистрации сигнала, выходящего после оптической схемы (см. рис. 2), при этом фотоприемное устройство 12 регистрирует отраженный сигнал  $K_{12-0}$ . ФПУ 11 регистрирует первоначальный сигнал  $K_{11-0}$ . Рассчитываем отношение полученных сигналов  $K_0 = K_{12-0}/K_{11-0}$  и переходим ко второму этапу. Смещаем зеркало 8 в левое положение и выводим лазерный пучок на трассу. ФПУ-12 регистрирует от зеркала 9 обратно отраженный сигнал  $K_{12-1}$ , одновременно ФПУ-11 регистрирует исходный сигнал  $K_{11-1}$ . Аналогично  $K_1 = K_{12-1}/K_{11-1}$ . Отношение  $K_1/K_0$ , является коэффициентом пропускания лазерного излучения  $\tau$  на трассе длиной  $L$ .

$$\tau = K_1/K_0. \quad (2)$$

Одновременно с измерением пропускания и определением регистрировались время и дата измерений, а также основные параметры атмосферы: температура, влажность, наличие облаков и осадков. Температура и влажность воздуха измерялись с помощью беспроводной метеостанции Vantage Vue.

### Расчет погрешностей

Относительная погрешность измерения электрического сигнала фотодиодов с помощью осциллографа Tektronix TDS3014 по нашей методике составляет:

$$\delta_{K_0} = \delta_{K_1} = \pm 3 \%$$

Относительная погрешность измерения трассы длиной 400 м дальномером составляет  $\delta_L = \pm 5 \%$ .

Исходя из соотношения (2) найдем относительную погрешность определения коэффициента пропускания трассы  $\tau$ :

$$\delta_{\tau_L} = \pm \frac{1}{K_1} \sqrt{\delta_{K_1}^2 + \tau \delta_{K_0}^2}, \quad (3)$$

$K_1 = 1,96$  – получено экспериментально.

Относительная ошибка измерений МОД  $\delta_{S_{\text{мод}}}$  определялась по формуле, вытекающей из соотношения (1):

$$\delta_{S_{\text{мод}}} = \frac{\ln(0,05)}{\ln(\tau_L)} \sqrt{\delta_L^2 + L^2 \left( \frac{\delta_{\tau_L}}{\ln(\tau_L)\tau_L} \right)^2}. \quad (4)$$

### Экспериментальные результаты

С использованием методики измерений в различных погодных и сезонных условиях и в различное время суток проводились измерения пропускания лазерного излучения атмосферой на трассе длиной 400 м и определялось значение  $S_{\text{мод}}$ . Всего было проведено более 500 измерений.

Экспериментально полученные средние значения МОД для исследуемых длин волн при различных погодных условиях с погрешностями, которые рассчитывались по формуле (4), представлены в таблице.

Из таблицы можно сделать следующие выводы:  
– наибольшим пропусканием, из рассмотренных длин волн, обладают 1,06 и 1,07 мкм;

– с наступлением осадков любой интенсивности установка становится значительно точнее. Это связано с тем, что МОД уменьшается, и отношение длины измерительной базы к МОД становится выше, что приводит к уменьшению погрешности измерений;

– в случае отсутствия осадков или при наличии осадков небольшой интенсивности МОД для длины волны 1,06 мкм более чем в 2 раза выше, чем для 0,63 мкм;

– метеорологическая оптическая дальность для длины волны 0,53 мкм приблизительно в 2 раза меньше, чем для длины волны 1,06 и 1,07 мкм. Однако сравнима с МОД для 0,63 мкм;

– с наступлением осадков небольшой интенсивности МОД снижается более чем в 2 раза, а при обильных осадках МОД уменьшается более чем в 10 раз в сравнении с ясной погодой;

– данная методика является высокоточной методикой измерения метеорологической оптической дальности на горизонтальной трассе в сравнении с аналогами.

МОД при ясной погоде для длины волны 1,06 мкм сравнима с МОД для 1,07 мкм и значительно выше, чем МОД для 0,53 и 0,63 мкм.

В связи с этим можно сделать вывод, что для лазерного зондирования целесообразнее использовать генератор излучения с длиной волны 1,06 мкм или 1,07 мкм. На этих длинах волн пропускание атмосферы, и, следовательно, МОД, существенно выше, чем при использовании лазеров на длине волны 0,53 или 0,63 мкм.

Анализ результатов, полученных с помощью данной методики, показал, что в нашей местности для исследованных длин волн, значения МОД равны:

$$S_{\text{мод}0,532} = 30 \text{ км}; S_{\text{мод}0,63} = 24 \text{ км}; S_{\text{мод}1,06} = 60 \text{ км} \text{ и } S_{\text{мод}1,07} = 64 \text{ км} \text{ – при ясной погоде.}$$

$S_{\text{мод}0,63} = 12 \text{ км}; S_{\text{мод}1,06} = 17 - 30 \text{ км}$  – в случае выпадения осадков слабой интенсивности.

$S_{\text{мод}0,63} = 3 - 7 \text{ км}; S_{\text{мод}1,06} = 3 - 13 \text{ км}$  – в случае выпадения обильных осадков.

Сопоставление полученных результатов с литературными данными [2] показывает, что результаты согласуются между собой.

Средние значения МОД для исследуемых длин волн лазерного излучения при различных погодных условиях

Длина волны излучения, мкм	МОД, км. Ясная погода	МОД, км. Моросящий дождь	МОД, км. Дождь	МОД, км. Снег слабой интенсивности	МОД, км. Снег
0,532	30±9	–	–	–	–
0,63	24±5	12,1±1,3	7,1±0,5	12,0±1,3	3,0±0,1
1,06	60±22	29,5±8,6	13,0±1,8	17±2	3,0±0,1
1,07	64±25	–	–	–	–

## Турбулентность

Солнечное излучение, поглощенное земной поверхностью, дает вклад в нагрев слоев воздуха в нижней атмосфере. Плотность воздуха принимает локальные значения, зависящие от температурных условий. Флуктуации плотности порождают конвекционное движение газа; этот процесс называется атмосферной турбулентностью [3].

При распространении лазерного излучения в турбулентной атмосфере происходит уширение и расщепление пучка, флуктуации направления и изменение распределения интенсивности в его сечении (амплитудные синцитилляции).

Расширение коллимированного пучка с учетом его дифракционного расхождения и блуждания описывается выражением:

$$d_2 = 16d_0^2 + \frac{16L}{Kd_0^2} + 8,76C_n^2 l_0^{-1/3} L^3, \quad (5)$$

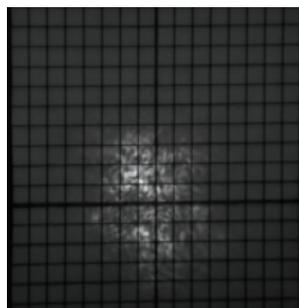
где  $d_0$  – начальный диаметр пучка,  $L$  – длина трассы,  $K$  – волновое число,  $C_n^2$  – структурная постоянная,  $l_0$  – внутренний масштаб турбулентности.

При распространении в приземной атмосфере узких и сфокусированных пучков излучения оптического квантового генератора (ОКГ) уширение их за счет турбулентности бывает столь значительным, что интенсивность на оси пучка может снизиться в 20 и более раз по сравнению с рассчитанной без учета влияния турбулентности. Снижение интенсивности в центре пучка сопровождается расширением диаграммы направленности пучка и усилением ореольного эффекта [2].

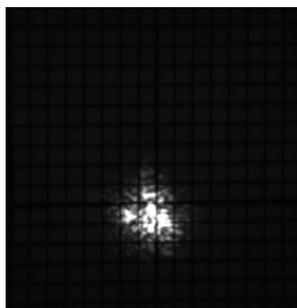
Результаты исследования структурной постоянной  $C_n$  в течение суток представлены на рис. 3 [3].



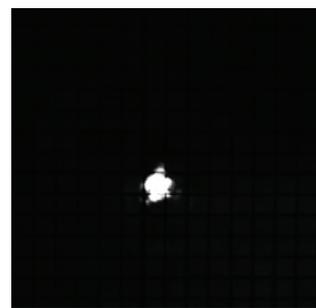
Рис.3. Результаты измерения структурной постоянной  $C_n$  в течение суток



а



б



в

Рис.5. Влияние турбулентной атмосферы на диаметр лазерного пучка при различных погодных условиях: а – солнце,  $d = 8$  см; б – затмение солнца тучами,  $d = 4$  см; в – пасмурная погода, моросящий дождь,  $d = 1,25$  см

Как видно из рис. 3, большое влияние турбулентности на пучок света происходит во время наибольшей солнечной активности.

### Экспериментальная схема измерений

На рис. 4 представлена разработанная схема для исследования влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок.

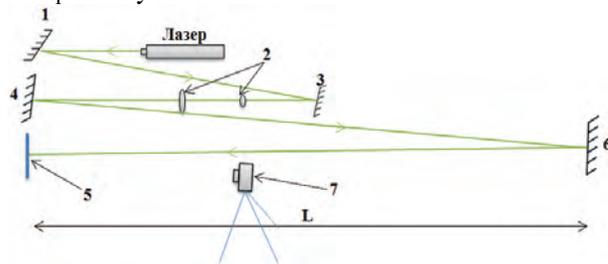


Рис. 4. Общая схема установки для исследования влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок на горизонтальной трассе: 1, 3, 4, 6 – глухие зеркала; 2 – телескоп; 5 – сетчатый экран

Телескоп 2 предназначен для расширения лазерного пучка и фокусировки приходящего с трассы излучения на экране 5. Зеркало 4 применяется для вывода излучения на трассу, при этом зеркало 6 настраивается таким образом, чтобы пучок вернулся строго на экран 5. Излучение с трассы на экране 5 фиксируется с помощью видеокамеры 7 для дальнейшей обработки.

Для обработки экспериментов и автоматической регистрации кадров в любое время суток были написаны программы в среде разработки LabView, поэтому удалось получить более 3000 экспериментальных данных.

### Экспериментальные результаты

На рис. 5 представлены наблюдаемые кадры на экране при характерных изменениях погоды. Измерения производились при неизменных параметрах оптической системы.

Из рис. 5 видна сильная изменчивость влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок при изменении погодных условий.

По полученным экспериментальным данным построена зависимость диаметра сфокусированного пучка с горизонтальной трассы длиной 360 м на экране от времени суток в солнечный день. График зависимости представлен на рис. 6.



Рис. 6. Зависимость диаметра сфокусированного пучка с трассы длиной 360 м на экране от времени суток в солнечный день

Из рис. 6 видно, что в солнечный день наибольшее влияние турбулентной атмосферы на распространение лазерного пучка соответствует периоду с 11 до 15 часов.

Во время проведения экспериментов были замечены мгновенные изменения диаметра регистрируемого пучка при затмении солнца тучами. По этой причине была снята зависимость диаметра пучка при ясной погоде от диаметра пучка в момент затмения солнца тучам. График зависимости представлен на рис. 7.

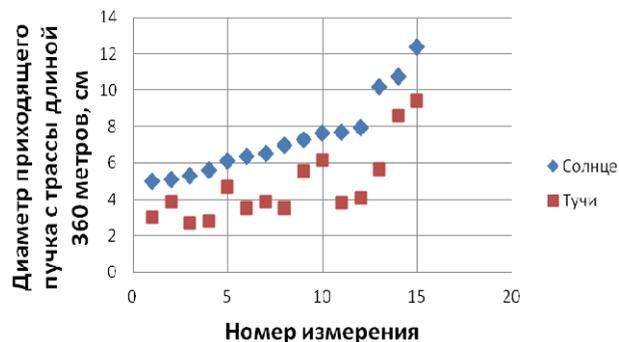


Рис. 7. Изменение диаметра сфокусированного пучка при затмении солнца тучами

Из рис. 7 следует вывод, что при затмении солнца тучами диаметр пучка уменьшается более чем в 1,5 раза.

Далее была собрана статистика изменения диаметра сфокусированного лазерного пучка в пасмурный день. График представлен на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что диаметр пучка в пасмурную погоду изменяется не более чем на 30 % от среднего значения в течение суток.



Рис. 8. Зависимость диаметра лазерного пучка от времени суток в пасмурный день

## Выводы

В результате выполнения работы получены следующие основные результаты:

- доработана и адаптирована к условиям проведения наших экспериментов методика измерений коэффициента пропускания атмосферы;
- экспериментально измерены коэффициенты пропускания лазерного излучения атмосферой для нескольких длин волн и рассчитаны  $S_{\text{мод}}$  в различных метеорологических условиях;
- анализ полученных данных показал, что для лазерного зондирования целесообразнее использовать генератор излучения длиной волны 1,06 или 1,07 мкм;
- показано, что в течение времени наблюдений  $S_{\text{мод}}$  может меняться в достаточно широких пределах вследствие изменения погодных условий;
- разработана установка для исследования влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок на горизонтальной трассе;
- для автоматизации экспериментальных исследований на установке были написаны программы в среде программирования LabView. Это позволило получить значительно больше экспериментальных данных.
- набрана статистика (более 3000 измерений) влияния турбулентной атмосферы на лазерный пучок в зависимости от погодных условий, температуры и влажности;
- получены уникальные зависимости диаметра фокусирующегося лазерного пучка от погодных условий и времени суток;
- экспериментально показано, что в солнечный день наибольшее влияние турбулентной атмосферы на лазерный пучок соответствует времени с 11 до 15 часов;
- при затмении солнца тучами диаметр пучка уменьшается более чем в 1,5 раза.
- диаметр пучка в пасмурную погоду изменяется не более чем на 30 % от среднего значения. При этом влияние турбулентной атмосферы на распространение лазерного пучка не зависит от времени суток.

## Литература

1. Зуев В. Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Сов. Радио, 1966.

2. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Оптика атмосферного аэрозоля. Т. 4. Л.: Гидрометеиздат, 1987.

3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: МИР, 1988.