УДК 621.373.826

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1550 нм

Б. И. Огнев, инженер, АО «МОСТКОМ», Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-3088-2318, e-mail: b ognev@mail.ru

С. А. Складчиков, мл. научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. Москва, Россия;

orcid.org/0000-0002-7234-5644,e-mail: skladtchikov@mail.ru

Е. Г. Чуляева, д.т.н., профессор, РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/000-0002-4459-3857, e-mail: elenachuljaeva@yandex.ru

Целью настоящей работы явилось моделирование процесса турбулентности вблизи приемной линзы приемопередающего лазерного модуля (ппм) входящего в систему атмосферной линии связи, и выявление изменения коэффициента преломления вблизи приемной площадки.

Для этого проведено в программе АНСИС компьютерное моделирование прохождения оптических сигналов вблизи приемных площадок. Показано, что лазерный луч из-за явления турбулентности расщепляется на несколько нитей. Ввиду того, что вблизи приемных площадок устройств приема оптических сигналов в атмосфере происходит неравномерное распределение коэффициентов преломления воздуха, лазерные пучки вблизи приемных площадок расщепляются. Это повышает требования к приемным площадкам оптических сигналов. В целях борьбы с явлением турбулентности в установках распространения лазерного луча устанавливают несколько лазерных передатчиков и приемников на разных длинах волн. Это повышает скорость передачи информации и надежность работы устройств.

Ключевые слова: турбулентность, оптические сигналы, лазерное излучение, траектория луча, расщепление оптического пучка.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-198-203

Введение

Вопросам распространения оптического излучения в среде уделяется большое внимание. Влияние атмосферы рассматривается в связи с появлением турбулентности вблизи стенок либо приемных площадок, например, в работах [1, 2]. Турбулентное перемешивание приводит к флуктуациям коэффициента преломления. Это, в свою очередь, приводит к изменениям направления распространение луча и смещению геометрического центра относительно центра наблюдения. Кроме того, происходит расщепление оптического пучка на отдельные «нити». Происходит перераспределение оптической мощности в сечении, при этом общая мощность остается неизменной. Задачей настоящего исследования является оценка влияния турбулентности на распространение оптических сигналов.

Экспериментальные исследования

Как показано в работе [1], потери на рассеяние в атмосфере из-за турбулентности незначительны, однако траектория луча претерпевает изменения, при этом повышается расходимость пучка и возникает неоднородность по сечению (рисунок 1).



Рисунок 1 – Влияние крупномасштабной турбулентности на распространение лазерного излучения Figure 1 – Influence of large-scale turbulence on the propagation



Рисунок 2 – Влияние мелкомасштабной турбулентности на распространение лазерного излучения Figure 2 – Influence of small-scale turbulence on the propagation of laser radiation

Приёмопередающий лазерный модуль (ППМ) имеет приемо-передающую оптическую систему, встроенную систему автоматической корректировки оси диаграммы направленности (ОДН), оптический усилитель (ОУ). Характеристики ппм-модуля:

- расходимость передатчика информационного канала - 0,15 мрад;

- моноапертурная оптическая система;
- оптическая система фокусирующего типа;
- базовая длина волны информационного канала 1550 нм;
- длина волны служебного канала 785 нм;
- числовая апертура объектива 0,22;
- угол зрения приемника информационного канала 0,3 мрад;
- диаметр приемопередающей апертуры 90 мм;
- качество объектива близко к дифракционному.

Для работы приемопередающего лазерного модуля используется две длины волны и соответственно реализовано деление на служебный канал (СЛК), который выступает в качестве сервисного и отвечает за точное наведение и передачу служебных данных о состоянии удалённого терминала и измерительный информационный канал (ИЗК), который используется для прохождения высокочастотных сигналов.

Служебный канал (СЛК) работает на длине волны 785 нм. Предназначен для организации работы системы автоматической подстройки осей диаграмм направленности и точного позиционирования терминалов установки друг относительно друга на различных дистанциях. Низкоскоростной канал используется для передачи только служебной информации, которая необходима для работы алгоритмов автоматической подстройки мощности передатчиков на удаленном терминале.

В зависимости от дистанции, на которой используется установка, алгоритмы обеспечивают управление сигналом от удаленного маяка, для подстройки ОДН и пространственного совмещения оптических осей СЛК и ИЗК, передачи информации о состоянии работы ключевых функциональных элементов терминала, параметров мощности на приёме/передаче, положения штоков приводов системы автоматической настройки ОДН и т.д. Служебный канал (СЛК) имеет более широкие диаграммы направленности для того, чтобы упростить процесс наведения. Актуальность использования для служебного канала длины волны 785 нм обусловлено наличием доступных и относительно недорогих ключевых компонентов: приёмников, передатчиков, высокоскоростных матриц.

Измерительный (информационный) канал (ИЗК) работает на длине волны 1550 нм.



Рисунок 3 – Приемопередающий модуль: 1 – приемопередающие линзы – приемные площадки приемопередающего модуля; 2 – устройство управления лазерным модулем Figure 3 – Transceiver module

Как видно из рисунка 2, основное влияние турбулентность атмосферы будет оказывать вблизи входной – выходной линзы.

Как известно, турбулентность потока газа или жидкости описывается уравнениями Навье – Стокса. Численные решения уравнений Навье – Стокса приводят к нахождению профиля скорости течения газового потока [1].

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{l} \frac{\partial u}{\partial x} \right). \end{cases}$$
(1)

где вектор μ – вязкость, ρ – плотность газа, u – скорость потока, l – длина пластины.

Поскольку мы рассматриваем стационарный процесс в двух координатах x и y, c учетом, что в $\rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$, получим уравнения Стокса в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0, \ \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \$$
получим уравнения Стокса в виде $\left(\partial^2 u + \partial^2 u \right)_{-} dp$

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = \frac{dp}{\mu l dx}$$
(2)

Учитывая влияние взаимодействия молекул газа между собой приведем уравнение Ван дер Ваальса:

$$(p+a/V_m^2)(V_m-b) = RT.$$
 (3)

Здесь P – давление газа; a – постоянная Ван дер Ваальса; V_m – объем газа; b, a – постоянные для каждого газа величины, определяемые опытным путем; R – универсальная газовая постоянная 6,31810²³ 1 мольК.

Таким образом, изменение плотности по координатам x и y будет соответствовать изменению скорости воздушного потока.

Рассмотрим задачу о протекании воздушного потока вдоль пластины прямоугольного сечения. Обозначим высоту прямоугольника, параллельную оси y 2h, а расстояние вдоль оси x обозначим $2 \chi h$.

Для удобства упрощаем уравнение и представляем в виде

ξ

$$\left(\frac{\partial^2 u *}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u *}{\partial \eta^2}\right) = -1.$$

$$u * = 0 \operatorname{прu} \xi = \pm \chi;$$

$$|\eta| < 1 \operatorname{u} \operatorname{пpu} \eta = \pm 1;$$

$$< \chi; \quad \xi = \frac{x}{h}; \quad \eta = \frac{y}{h}; \quad u * = \frac{u\mu l}{h^2 \Delta p}.$$
(4)

∆р – изменение давления газа вдоль стенки

Моделируя в программе ANSYS выражения (5) и (10), получим рисунки распределения поля скоростей и плотностей газа (воздуха) при температуре 300 К.

Граничные условия: на выходе справа – давление равно 0, на входе скорость равна 0,1 м/с 5 раз из 50 итераций, т.е. с 1 по 5 итерацию скорость – 0,1, с 6 по 50 скорость равна 0, с 51 по 55 равна 0,1, с 56 по 100 равна 0 и т.д. На стенке условие означает наличие сдвига (перетаскивания) и отсутствие нормального компонента скорости на границе, как при отсутствии сквозного потока.



Рисунок 4 – Распределение скоростей вдоль поверхности линзы при турбулентных искажениях атмосферы. Слева поверхность линзы, вдоль оси у на расстояниях до 5 м показано распределение скорости воздуха. Вблизи линзы цвета, соответствующие наибольшим неравномерностям скорости (завихрения), а на расстоянии – распределение скоростей выравнивается Figure 4 – Velocity field along lens surface with turbulent atmospheric distortions



Iteration 300

Рисунок 5 – Изменения плотности воздуха вблизи линзы и на протяжении вдоль 5м при этом max плотность 1,177530e+00, min плотность 1,177529e+00 Figure 5 – Difference in air density near the lens and within the distance of up to 5m max density 1,177530e + 00 min density 1,177529e + 00

Таким образом, на рисунках наблюдаются ярко выраженные неравномерности плотности вблизи поверхности линзы (из-за турбулентности). Эти неравномерности будут способствовать искажению траектории луча. Причем, поскольку в центре линзы наибольшая плотность воздуха, луч будет расщепляться, по крайней мере на три луча. При этом плотность воздуха меняется от максимальной до минимальной вблизи линзы.

Библиографический список

1. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Аэрооптические эффекты в турбулентном потоке и их моделирование // ЖТФ, 2008, том 78, вып. 2. 77 с.

2. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 496 c.

3. Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений» // Федеральное агентство Российской Федерации по образованию Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Физико-механический факультет. Кафедра гидроаэродинамики Санкт-Петербург 2010 (Конспект лекций)

4. https://www.ansys.com/products/platform/ansys-cloud/free-trial.

УДК 621.373.826

TURBULENCE INFLUENCE TO OPTICAL SIGNAL PROPAGATION WITH WAVELENGTH 1550 nm

B. I. Ognev, engineer, JSC «MOSTKOM», Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-3088-2318, e-mail: b ognev@mail.ru

S. A. Skladchikov, junior researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

orcid.org/0000-0002-7234-5644, e-mail: skladtchikov@mail.ru

E. G. Chulaeva, Dr. Sc. (Tech.), professor, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/000-0002-4459-3857, e-mail: elenachuljaeva@yandex.ru

In this work authors present computational modeling results of optical signals passage near the receiving sites made in ANSYS program complex. Laser beam is split into several filaments due to the phenomenon of turbulence. Due to the fact that uneven distribution of air refraction coefficients occurs near the receiving sites of optical signal receiving devices in the atmosphere, laser beams are split near the receiving sites. It means that requirements for the receiving sites of optical signals should be increased. To solve the problem

with phenomenon of turbulence, several laser transmitters and receivers at different wavelengths should be installed in laser beam propagation installations. It increases the speed of information transfer and the reliability of the devices.

Key words: turbulence, optical signals, laser radiation, beam path, optical beam splitting.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-198-203

References

1. Volkov K. N., Emel'yanov V. N. Aeroopticheskie effekty v turbulentnom potoke i ih modelirovanie. *ZHTF*. 2008, vol. 78, no. 2. 77 p. (in Russian).

2. **Zuev V. E.** *Rasprostranenie vidimyh i infrakrasnyh voln v atmosfere*. Moscow: Sov. Radio. 1970. 496 p. (in Russian).

3. Techeniya vyazkoj zhidkosti i modeli turbulentnosti: metody rascheta turbulentnyh teche-nij». Federal'noe agentstvo Rossijskoj Federacii po obrazovaniyu Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet Fiziko-mekhanicheskij fakul'tet Kafedra gid-roaerodinamiki Sankt-Peterburg 2010 (Konspekt lekcij). (in Russian).

4. https://www.ansys.com/products/platform/ansys-cloud/free-trial.