

## ОЦЕНКА ДОПУСТИМОЙ ДЛИНЫ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ К КОЭФФИЦИЕНТУ ГОТОВНОСТИ

А.Р. Дедюхин, магистрант

Н.А. Карвелис, магистрант

Н.Д. Зимовец, магистрант

Научный руководитель: С.И. Зимин, канд. пед. наук, доцент

Московский технический университет связи и информатики

(Россия, г. Москва)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-4-2-35-39

**Аннотация.** В работе рассматривается задача определения предельной длины атмосферной оптической линии связи при заданном коэффициенте готовности. Предложен метод, основанный на использовании статистической модели атмосферных условий и введении пороговых значений длины линии, соответствующих отдельным состояниям атмосферы. Показано, что коэффициент готовности может быть представлен в виде кусочно-постоянной функции длины линии, что позволяет перейти от прямого расчета надежности к решению обратной задачи определения допустимой протяженности канала связи. Выполнен расчет для типичных атмосферных условий, демонстрирующий влияние различных состояний среды на предельную длину линии. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании атмосферных оптических линий связи с учетом требований к надежности и климатических факторов эксплуатации.

**Ключевые слова:** атмосферные оптические линии связи; коэффициент готовности; надежность; затухание оптического сигнала; статистическая модель; предельная длина линии; атмосферные условия.

Атмосферные оптические линии связи (АОЛС, Free Space Optics – FSO) являются перспективным решением для организации высокоскоростной передачи данных, в частности на участках «последней мили» и при резервировании каналов связи, благодаря высокой пропускной способности и отсутствию необходимости прокладки кабельной инфраструктуры [1-3].

Вместе с тем надежность функционирования АОЛС существенно зависит от состояния атмосферного канала. Туман, осадки и аэрозольные образования приводят к ослаблению оптического сигнала вследствие рассеяния и поглощения излучения, что при снижении метеорологической видимости вызывает значительное увеличение потерь в канале связи [4-7].

Для инженерной оценки затухания широко применяются эмпирические модели, связывающие коэффициент ослабления с дальностью видимости, в частности модели Кима и Аль-Набулси [8, 9]. На их основе, с учетом статистического распределения атмосферных состояний, определяется коэффициент готов-

ности линии связи как интегральная характеристика ее работоспособности [10-12].

Однако существующие исследования преимущественно ориентированы на определение коэффициента готовности при заданных параметрах линии связи, включая ее протяженность. При этом задача определения допустимой длины пролета при заданных требованиях к надежности освещена ограниченно.

Целью настоящей работы является разработка метода определения предельной длины атмосферной оптической линии связи при заданном коэффициенте готовности на основе статистической модели атмосферных условий.

### Постановка задачи

Рассматривается атмосферная оптическая линия связи длиной  $L$ , функционирующая на длине волны  $\lambda$ . Передача сигнала осуществляется через атмосферный канал, параметры которого изменяются во времени под воздействием метеорологических факторов.

Состояние атмосферы описывается конечным набором дискретных состояний  $S_i$ , каждому из которых соответствует дальность ви-

димости  $V_i$  и вероятность возникновения  $P_i$ . Для каждого состояния определяется коэффициент затухания оптического сигнала и потери на трассе.

Линия связи считается работоспособной, если суммарные потери не превышают допустимого значения  $A_{dop}$ , определяемого энергетическим бюджетом системы. Коэффициент

где  $K_{req}$  – заданное требуемое значение коэффициента готовности.

### Математическая модель оценки параметров АОЛС

где значение коэффициента  $q$  определяется в соответствии с диапазоном изменения дальности видимости [8,9].

Данная зависимость широко применяется при инженерной оценке характеристик атмосферного канала [1,4].

готовности линии  $K(L)$  определяется как суммарная вероятность состояний, при которых выполняется условие работоспособности.

Требуется определить предельную длину линии связи  $L_{max}$ , при которой выполняется условие

$$K(L) \geq K_{req} \quad (1)$$

Для оценки затухания оптического сигнала в атмосферном канале используется эмпирическая зависимость, связывающая коэффициент ослабления  $\gamma$  с дальностью видимости  $V$  и длиной волны  $\lambda$ :

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (2)$$

Потери сигнала на трассе длиной  $L$  для каждого состояния атмосферы  $S_i$  определяются выражением:

$$A_i = \gamma_i \cdot L \quad (3)$$

Работоспособность линии связи в состоянии  $S_i$  обеспечивается при выполнении условия:

$$A_i \leq A_{dop} \quad (4)$$

Из данного условия следует, что для каждого состояния атмосферы существует предельная длина линии связи

$$L_i^* = \frac{A_{dop}}{\gamma_i} \quad (5)$$

при превышении которой передача сигнала с требуемым качеством не обеспечивается.

С учетом введенных обозначений коэффициент готовности линии связи может быть представлен в виде функции длины линии:

$$K(L) = \sum_{i: L \leq L_i^*} P_i \quad (6)$$

где суммирование выполняется по всем состояниям атмосферы, в которых сохраняется работоспособность линии связи.

### Метод определения предельной длины линии

Определение предельной длины атмосферной оптической линии связи основывается на анализе пороговых значений длины  $L_i^*$ , соот-

ветствующих отдельным состояниям атмосферного канала.

Для каждого состояния атмосферы  $S_i$  на основе рассчитанного коэффициента затухания  $\gamma_i$  определяется предельная длина линии  $L_i^*$  в соответствии с выражением (5).

характеризующая максимальную протяженность линии, при которой сохраняется работоспособность в данном состоянии.

Полученные значения  $L_i^*$  формируют набор пороговых точек, определяющих изменение состава работоспособных состояний при увеличении длины линии связи. При возрастании  $L$  из множества работоспособных последовательно исключаются состояния атмосферы, для которых выполняется условие  $L > L_i^*$ .

$$L_{max} = \max \{L: K(L) \geq K_{req}\} \quad (7)$$

Практическая реализация метода сводится к упорядочиванию значений  $L_i^*$  и последовательному анализу соответствующих значений коэффициента готовности до момента нарушения заданного условия. Такой подход позволяет переходить от прямого расчета надежности при фиксированной длине линии к решению обратной задачи определения допустимой протяженности канала связи.

Предложенный подход соответствует инженерным методам оценки параметров АОЛС и может быть использован при проектирова-

В результате коэффициент готовности линии  $K(L)$  представляет собой кусочно-постоянную функцию длины, определяемую суммой вероятностей состояний, удовлетворяющих условию работоспособности.

Предельная длина линии связи  $L_{max}$  определяется как максимальное значение длины, при котором выполняется требование к коэффициенту готовности:

нии линий связи с заданными требованиями к надежности [2, 3].

#### Численный анализ определения предельной длины АОЛС

Рассмотрим задачу определения предельной длины атмосферной оптической линии связи при заданном коэффициенте готовности  $K_{req} = 0,97$ . Линия функционирует на длине волны  $\lambda = 1550\text{нм}$ , допустимый уровень потерь составляет  $A_{доп} = 10\text{дБ}$ .

Статистическая модель атмосферных условий представлена в таблице 1.

Таблица 1. Параметры атмосферных состояний

Состояние атмосферы	$V_i$ , км	$P_i$
Ясная погода	10	0,70
Легкая дымка	2	0,20
Слабый туман	1	0,07
Туман	0,5	0,02
Плотный туман	0,2	0,01

Результаты для каждого состояния рассчитываются коэффициенты затухания  $\gamma_i$  и соответствующие предельные длины линии  $L_i^*$  приведены в таблице 2.

Таблица 2. Пороговые длины работоспособности для различных состояний атмосферы

Состояние атмосферы	$\gamma_i$ , дБ/км	$L_i^*$ , км
Ясная погода	0,1	100
Легкая дымка	1,0	10
Слабый туман	2,3	4,35
Туман	7,8	1,28
Плотный туман	19,5	0,51

Из таблицы 2 следует, что при увеличении длины линии связи состояния атмосферы последовательно выходят из области работоспособности в порядке возрастания потерь сигнала.

Коэффициент готовности линии определяется как сумма вероятностей состояний, удовлетворяющих условию  $L \leq L_i^*$ . При этом ха-

рактер изменения  $K(L)$  носит ступенчатый характер.

Последовательный анализ пороговых значений показывает, что при длине линии  $L \leq 0,51$  км работоспособны все состояния атмосферы, и коэффициент готовности составляет  $K = 1,00$ . При увеличении длины до диапазона  $0,51 < L \leq 1,28$  км из множества работо-

способных состояний исключается плотный туман, что приводит к снижению коэффициента готовности до  $K = 0,99$ . В интервале  $1,28 < L \leq 4,35$  км дополнительно исключается состояние «туман», и коэффициент готовности составляет  $K = 0,97$ . При дальнейшем увеличении длины линии ( $L > 4,35$  км) исключается также состояние «слабый ту-

ман», в результате чего коэффициент готовности снижается до  $K = 0,90$ .

С учетом заданного требования  $K_{req} = 0,97$  предельная длина линии определяется как максимальное значение, при котором сохраняется указанное условие:

$$L_{max} = 4,35 \text{ км}$$

Полученный результат показывает, что предельная длина линии определяется пороговым состоянием атмосферы, при исключении которого коэффициент готовности становится ниже требуемого значения. В рассматриваемом случае таким состоянием является слабый туман, характеризующийся умеренным уровнем затухания и сравнительно высокой вероятностью возникновения.

#### Заключение

В работе предложен метод определения предельной длины атмосферной оптической линии связи при заданном коэффициенте готовности, основанный на использовании статистической модели атмосферных условий. В отличие от традиционного подхода, ориентированного на расчет надежности при фиксированной длине линии, предложенный метод позволяет решать обратную задачу – определять допустимую протяженность канала связи с учетом требований к надежности.

Ключевой особенностью подхода является введение пороговых значений длины линии для отдельных состояний атмосферы, что позволяет представить коэффициент готовности в виде кусочно-постоянной функции длины и выполнять его расчет без прямого перебора параметров линии.

Проведенный расчет показал, что предельная длина линии определяется наиболее вероятными состояниями атмосферы с умеренным уровнем затухания, тогда как редкие, но экстремальные условия оказывают ограниченное влияние на итоговое значение коэффициента готовности.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании атмосферных оптических линий связи и выборе параметров системы с учетом климатических условий эксплуатации. Предложенный метод обеспечивает простоту реализации и может служить инструментом для предварительной инженерной оценки параметров АОЛС.

#### Библиографический список

1. Free-Space Laser Communications: Principles and Advances / edited by A.K. Majumdar, J.C. Ricklin. – New York: Springer, 2010. – 418 p. – ISBN 978-0-387-28677-8.
2. Kaushal H., Jain V.K., Kar S. Free Space Optical Communication. – Cham: Springer, 2017. – XXIX, 209 p. – DOI: 10.1007/978-81-322-3691-7. – ISBN 978-81-322-3689-4.
3. Bohara V.A., Swaminathan R. Free-Space Optical Communication // Optical and Wireless Access Networks. – Cham: Springer, 2025. – P. 35-56. – DOI: 10.1007/978-3-031-89696-5\_4.
4. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser Beam Propagation through Random Media. – 2nd ed. – Bellingham, WA: SPIE Press, 2005. – 808 p. – DOI: 10.1117/3.626196. – ISBN 978-0-8194-5948-0.
5. Khalighi M.A., Uysal M. Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – Vol. 16, № 4. – P. 2231-2258. – DOI: 10.1109/COMST.2014.2329501.
6. Alimi I.A., Monteiro P.P. Revolutionizing Free-Space Optics: A Survey of Enabling Technologies, Challenges, Trends, and Prospects of Beyond 5G Free-Space Optical (FSO) Communication Systems // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 24. – Article 8036. – DOI: 10.3390/s24248036.
7. Kaushal H., Kaddoum G. Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19, № 1. – P. 57-96. – DOI: 10.1109/COMST.2016.2603518.

8. Al Naboulsi M., Sizun H., de Fornel F. Visibility effect on the availability of a terrestrial free-space optical link // Optical Fiber Technology. – 2004. – Vol. 10, № 1. – P. 55-66. – DOI: 10.1016/j.yofte.2003.08.002.
9. Kim I.I., McArthur B., Korevaar E.J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4214. – P. 26-37. – DOI: 10.1117/12.417512.
10. Basahel A., Al-Khateeb W., Islam M.R., Habaebi M., Suriza A. Availability analysis of terrestrial free-space optical link under rain conditions // International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). – 2014. – P. 169-172.
11. Kim G., Kim H. Link Reliability of Satellite-to-Ground Free-Space Optical Communication Systems in South Korea // IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2022). – 2022. – DOI: 10.1109/MILCOM55135.2022.10017828.
12. Majumdar A.K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel // Journal of Optical and Fiber Communications Reports. – 2005. – Vol. 2, № 4. – P. 345-396. – DOI: 10.1007/s10297-005-0054-0.

## ASSESSMENT OF THE MAXIMUM ALLOWABLE LENGTH OF A FREE-SPACE OPTICAL COMMUNICATION LINK CONSIDERING AVAILABILITY REQUIREMENTS

**A.R. Dedyukhin**, Graduate Student

**N.A. Karvelis**, Graduate Student

**N.D. Zimovets**, Graduate Student

**Supervisor:** S.I. Zimin, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

**Moscow Technical University of Communications and Informatics**

**(Russia, Moscow)**

**Abstract.** The paper addresses the problem of determining the maximum allowable length of a free-space optical (FSO) communication link under a заданного required availability level. A method is proposed based on a statistical model of atmospheric conditions and the introduction of threshold link lengths corresponding to individual atmospheric states. It is shown that the availability coefficient can be represented as a piecewise-constant function of the link length, which enables the transition from direct reliability evaluation to solving the inverse problem of determining the permissible link distance. A numerical example for typical atmospheric conditions is presented, demonstrating the influence of different atmospheric states on the maximum link length. The obtained results can be used in the design of FSO systems, taking into account reliability requirements and environmental factors.

**Keywords:** free-space optical communication; availability coefficient; reliability; optical signal attenuation; statistical model; maximum link length; atmospheric conditions.