

ВОПРОСЫ УЧЕТА АТМОСФЕРНЫХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМ ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Маммадов А.М.¹, Ибрагимова А.Э.²

DOI:10.21681/3034-4050-2025-3-65-69

Ключевые слова: оптическая система, передача информации, атмосфера, ослабление сигнала, оптимизация, интенсивность, дождь

Аннотация

Цель работы: оптимизация работы FSO системы распределенного типа, где центральный передающий центр посылает оптические сигналы на n количество приемников, удаленных от центрального пункта на разные расстояния.

Метод: Введено на рассмотрение оптимизационная функция в виде функциональной зависимости между интенсивностью дождей (R) и дистанции до оптических приемников l . Составлен целевой функционал содержащий оптимизационную функцию и характеризующий суммарное ослабления оптического сигнала по всем каналам. Сформулирована и решена оптимизационная задача вычисления оптимального вида указанной функции при котором суммарное ослабления оптического сигнала достигает минимальной величины.

Результаты исследования: решена оптимизационная задача, которое показало, что при наличии обратной логарифмической зависимости l от R суммарное ослабление в распределенной FSO системе достигает минимальной величины.

Научная новизна: впервые решена задача оптимального учета влияния дождей на эффективность работы FSO систем распределенного типа, с учетом ослабления используемого лазерного луча при наложении ограничения на суммарную протяженность дистанций до приемников.

Введение

Хорошо известно, что системы лазерной атмосферной связи обладают такими преимуществами, как отсутствие явлений электромагнитной интерференции, отсутствие собственного электромагнитного излучения, возможность стыковки с оптоволоконными системами, возможность быстрого развертывания, низкая степень битовых ошибок [1–3]. Основным недостатком так их систем (далее FSO систем) заключается в подверженности интенсивности используемого лазерного луча влиянию атмосферных и метеорологических факторов, таких как туман, дождь, снег, рассеяние аэрозольными частицами. Общее ослабление α сигнала в FSO системах может быть выражено следующим уравнением:

$$\alpha = \alpha_{\text{туман}}(\lambda) + \alpha_{\text{снег}} + \alpha_{\text{дождь}} + \alpha_{\text{рас}}, \text{ dB/км}$$

где $\alpha_{\text{рас}}$ — ослабление из-за рассеяния аэрозольными частицами.

В общем случае $\alpha_{\text{туман}}(\lambda)$ превышает $\alpha_{\text{дождь}}$, однако в тех решениях, где частотность появле-

ния дождей выше частотности появления тумана фактором дождя нельзя пренебречь. Согласно [4], ослабление из-за дождя линейно растет в зависимости от интенсивности дождя. Согласно [5] при увеличении интенсивности дождя увеличивается и размер дождевых капель, что в свою очередь, приводит к ослаблению оптического луча из-за таких явлений как отражение и рефракция. Удельное ослабление в системах FSO определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{дождь}} = kR^a, \text{ dB/км}$$

где R — интенсивность дождя в мм/час.

Согласно [6] ослабление из-за снега вычисляется аналогичной формулой:

$$\alpha_{\text{снег}} = aS^b, \text{ dB/км}$$

где коэффициенты a и b определяются следующим образом: $a=5,42 \cdot 10^{-4} \lambda + 5,49587$; $b=1,38$.

Как отмечается в работе [7], при хорошей видимости максимальное расстояние передачи оптического луча может быть определено по сле-

¹Маммадов Афлатун Масим оглы, кандидат технических наук, докторант Национального Аэрокосмического Агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: aflatunmasimoglu@gmail.com

²Ибрагимова Арзу Эльдар гызы, кандидат технических наук, Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: Suleymanovae535@gmail.com

дующей формуле:

$$L_{\max} = 10^{-\alpha/20}$$

Как отмечается в работе [3], применительно к дождю коэффициенты k и α сильно различны в различных регионах. Так, например, для Японии $k=1,58$; $\alpha=0,63$, а во Франции $k=1,076$; $\alpha=0,67$.

Согласно [1], удельное ослабление из-за дождя не зависит от длины волны оптического излучения, которая обычно выбирается в интер-

валах (0,78-0,85) и (1,520-1,600 мкм). Как было показано в работе [8], коэффициенты k и α дождя зависят от распределения дождевых капель по размерам, которое моделируется Гамма-функцией. Согласно работе [9], Гамма-функция характеризуется двумя показателями: параметр формы μ и интенсивность дождя. При этом μ изменяется в пределах $[-3 \div 8]$.

В таблице 1 приведены значения показателей k и α в зависимости от μ .

Таблица 1

Зависимость показателей k и α от показателя γ распределения μ

(μ)	k	α
-3	4.0684	0.2077
-2	2.2838	0.4050
-1	1.5921	0.5506
0	1.2924	0.6436
1	1.1394	0.7057
2	1.0505	0.7497
3	0.9938	0.7823
4	0.9551	0.8074
5	0.9273	0.8273
6	0.9065	0.8435
7	0.8905	0.8569
8	0.8779	0.8682

На рис. 1 показаны кривые зависимости удельного ослабления оптического луча от показателя μ и интенсивности дождя.

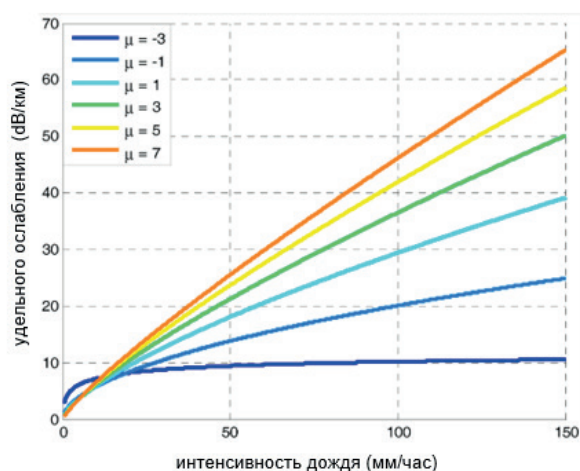


Рис. 1. Кривые зависимости ослабления оптического луча от показателя μ гамма распределения дождевых капель, по размеру, а также от интенсивности дождя

Вместе с тем, дождь являясь метеорологическим событием, является пространственно-зависимым процессом. Следовательно, закон распределения вероятности, т. е. показатель γ изменяется в зависимости от расстояния прохождения оптического луча, т. е. длины оптического канала передачи информации. На основе соответствующих данных могут быть составлены карты дождя, т. е. зависимость показателя γ от расстояния, которые могут быть использованы при проектировании систем FSO [1]. Однако также существуют модели, в которых учтены влияющие на ослабление луча общие факторы, такие как расстояние распространения луча. Так, например, согласно работе [10] имеем место следующее соотношение:

$$\alpha_{\text{дождь}} = \exp [-(0,05556+0,00848R - 3,66 \cdot 10^{-5} R^2) l]$$

где l -расстояние прохождения луча.

Целью настоящей статьи является применение модели типа (5) для определения оп-

тимальной конфигурации систем FSO распределенного типа с учетом ослабления луча из-за влияния дождя.

Материалы и методы

Структура исследуемой конфигурации FSO системы распределенного типа показана на рис. 2.

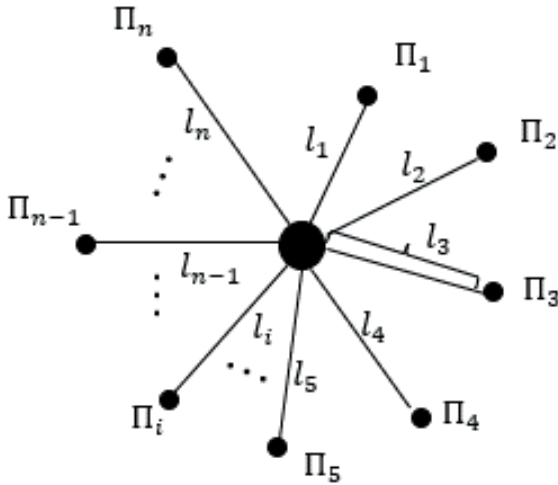


Рис. 2. Конфигурационная структура оптимизируемой системы распределенного FSO

Рассмотрим следующую дискретную модель распределенной системы FSO. Примем существование упорядоченного множества R :

$$R = \{R_i\}; i = (1, n)^-$$

где n -количество ветвей системы распределенной FSO.

Также примем существование множества L .

$$L = \{l_j\}; j = (1, n)^-$$

Введем на рассмотрение дискретную функцию:

$$l_j = \varphi(R_i)$$

на которую наложим следующее ограничительное условие:

$$\sum_{j=1}^n l_j = C_1; C_1 = const$$

На базе выражения (5) с учетом (7) составим следующий дискретный функционал F_g :

$$F_g = \sum_{j=1}^n \exp[-(a_1 + a_2 R - a_3 R^2) l_j(R_i)]$$

где

$$a_1 = 0,05536; a_2 = 0,00848; a_3 = 3,66 \cdot 10^{-5}$$

Далее, для удобства математических преобразований дискретные модели (9) и (11) заменим на эквивалентные непрерывные модели

$$\int_{R_{min}}^{R_{max}} \varphi(R) dR = C_2; C_2 = const$$

$$F_H = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \exp[-(a_1 + a_2 R - a_3 R^2) \varphi(R)] dR$$

С учетом выражений (12) и (13) составим следующий целевой функционал F_0 безусловной вариационной оптимизации:

$$F_0 = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \exp[-(a_1 + a_2 R - a_3 R^2) \varphi(R)] dR + \lambda [\int_{R_{min}}^{R_{max}} \varphi(R) dR - C_2]$$

где λ — множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи (14) удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{d\{\exp[-(a_1 + a_2 R - a_3 R^2) \varphi(R)] + \lambda \varphi(R)\}}{d\varphi(R)} = 0$$

Из условия (15) находим:

$$[\exp[-(a_1 + a_2 R - a_3 R^2) \varphi(R)]](-a_1 + a_2 R - a_3 R^2) + \lambda = 0$$

Из выражения (16) получим

$$\exp[-(a_1 + a_2 R - a_3 R^2) \varphi(R)] = \frac{\lambda}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2}$$

Логарифмируя обе стороны (17) получим

$$\varphi(R) = \frac{1}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2} \cdot \ln \left[\frac{a_1 + a_2 R - a_3 R^2}{\lambda} \right]$$

Таким образом, при решении (18) суммарное ослабление в распределенной FSO системе достигает экстремальной величины.

Для определения типа экстремума воспользуемся правилом Лагранжа. Вычислим следующую величину:

$$\beta = \frac{d^2\{\exp[-(a_1 + a_2 R - a_3 R^2) \varphi(R)] + \lambda \varphi(R)\}}{d\varphi(R)^2}$$

Подсчеты показывают, что β является всегда положительной величиной. Следовательно, при решении (18) суммарное ослабление в распределенной FSO системе достигает минимума.

Рассмотрим вопрос о вычислении λ . С учетом выражений (12) и (18) напишем:

$$\int_{R_{min}}^{R_{max}} \frac{1}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2} \cdot \ln \left[\frac{a_1 + a_2 R - a_3 R^2}{\lambda} \right] dR = C_2$$

Из выражения (20) находим:

$$\int_{R_{min}}^{R_{max}} \frac{1}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2} \ln \left[\frac{a_1 + a_2 R - a_3 R^2}{\lambda} \right] dR - \int_{R_{min}}^{R_{max}} \frac{\ln \lambda}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2} dR = C_2$$

Из выражения (21) находим

$$[\ln \lambda] \cdot \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{1}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2} dR = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{\ln(a_1 + a_2 R - a_3 R^2)}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2} dR - C_2$$

Из выражения (22) получим

$$\ln \lambda = \frac{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{\ln(a_1 + a_2 R - a_3 R^2)}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2} dR - C_2}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{dR}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2}}$$

Из выражения (23) получим:

$$\lambda = \exp \left[\frac{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{\ln(a_1 + a_2 R - a_3 R^2)}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2} dR - C_2}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{dR}{a_1 + a_2 R - a_3 R^2}} \right]$$

Таким образом, с учетом $\lambda = \text{const}$ является положительной величиной выше сделанное заключение о характере вычисленного экстремума сохраняет свою силу.

Обсуждение

Таким образом, проанализирован вопрос о влиянии дождей на эффективность работы FSO систем, с учетом ослабления используемого лазерного луча из-за воздействия дождя. Рассмотрены FSO системы распределенного типа, в которой передающий центр посылает оптические сигналы на n количество приемников, удаленных от оптического передающего центра на разные расстояния. Введено на рассмотрение функциональная зависимость между интенсивностью до-

ждей (R) и расстоянием до оптических приемников l . Составлен целевой функционал зависящий от указанной функциональной связи и характеризующий суммарное ослабления оптического сигнала по всем каналам. Сформулирована и решена оптимизационная задача вычисления оптимального вида указанной функции при котором суммарное ослабления оптического сигнала достигает минимальной величины. Решение оптимизационной задачи показало, что при наличии обратной логарифмической зависимости l от R суммарное ослабление в распределенной FSO системе достигает минимальной величины.

Заключение

Определено, что в FSO системе распределенного типа при воздействии фактора дождя возможен оптимальный режим функционирования, в котором суммарное ослабление оптического сигнала достигает минимума.

- ❖ Поставлена и решена оптимизационная вариационная задача для решения вопроса о выборе конфигурации распределенного типа FSO.
- ❖ Показано в результате решения оптимизационной задачи, что суммарное ослабление оптического сигнала в распределенной FSO системе может достичь минимума в том случае, если между показателями l и R существует обратная логарифмическая взаимосвязь.

Литература / References

1. Zafar, S., Khalid, H. Free Space Optical Networks: Applications, Challenges and Research Directions. Wireless Pers Commun 121, 429–457 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08644-4>.
2. Sharma, D., Tripathi, A., & Kumari, M. (2022). FSO systems for next generation networks: a review, techniques and challenges. Journal of Optical Communications, 0(0). <https://doi.org/10.1515/joc-2022-0288>.
3. Sharma, Neeraj. «Performance comparison of different intensity modulation formats for FSO systems». Journal of Optical Communications, 2024. <https://doi.org/10.1515/joc-2024-0159>.
4. E. Verdugo, L. Da Silva Mello, C. Pereira Colvero and R. Nebuloni, «Estimation of Rain Attenuation in FSO Links based on Visibility Measurements», 2023 17-th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 2023, pp. 1–5, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133748.
5. Douatia Kone, Pentjiligu Adama Soro, Aladji Kamagat. Evaluation of Free Space Optical (FSO) Link Under Weather Conditions in Abidjan. International Journal of Physics, 2024, 12 (6), pp.247-259. [ff10.12691/ijp-12-6-1ff](https://doi.org/10.12691/ijp-12-6-1ff). [ffhal-04784598](https://doi.org/10.12691/ijp-12-6-1ff)
6. Akiba M., Ogawa K., Wakamori K., Kodate K., Ito S. Measurement and simulation of the effect of snowfall on free space optical propagation// journal of applied optics. Vol. 47. No. 31. Pp. 5736–5743. Nov. 2008.
7. Rashed A., Mohamed A., Sharshar H., El-dien E. S. Laser atmospheric transmission limitations in optical wireless communication systems based on different transmission levels for short and local areas network applications// International journal for research in applied science & engineering technology. Vol. 2. Issue X. Oct 2014.
8. Capsoni C., Nebuloni R. Effect of rain on free space optics // The eleventh URSI commission F open symposium on radio wave propagation and remote sensing PUC-RIO. Brazil. 2007. 277–280.
9. Ulbrich, C. W. Natural Variations in the Analytical form of the Raindrop Size Distribution. J. Clim. Appl. Meteor. 1983, 22, 1764–1775.
10. Carbonneau T., Wisley D. Opportunities and challenges for optical wireless, the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded market place // SPIE conference on optical wireless communications. 1998. Pp. 119–128.

ISSUES OF TAKING INTO ACCOUNT ATMOSPHERIC AND METEOROLOGICAL FACTORS IN THE CONSTRUCTION OF OPEN ATMOSPHERIC SYSTEMS OPTICAL COMMUNICATION

Mammadov A.M.¹, Ibragimova A.E.²

Keywords: optical system, information transmission, atmosphere, signal attenuation, optimization, intensity, rain.

Abstract

The purpose of the work is to optimize the operation of the FSO system of a distributed type, where the central transmitting center sends optical signals to the number of receivers remote from the central point at different distances. n

Method: An optimization function in the form of a functional dependence between the intensity of rain and the distance to optical receivers has been introduced. A target functional containing an optimization function and characterizing the total attenuation of the optical signal on all channels has been compiled.

Results of the study: the optimization problem was solved, which showed that in the presence of an inverse logarithmic dependence on the total attenuation in a distributed FSO system reaches a minimum value.

Scientific novelty: for the first time, the problem of optimal consideration of the impact of rain on the efficiency of FSO systems of distributed type is solved, taking into account the attenuation of the laser beam used when imposing a limit on the total length of distances to receivers.



¹Aflatun M. Memmedov, Ph.D. (in Tech), National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E mail: aflatunmasimoglu@gmail.com

²Arzu E. Ibragimov, Ph.D., Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Republic of Azerbaijan. E mail: Suleymanovae535@gmail.com