

Научная статья

УДК 535.317

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-62-67>

EDN:RLJIOJ



# Оптимизация влияния дождевых осадков на эффективность работы открытой лазерной атмосферной связи

Афлатун Масим Маммадов, [afatunmasimoglu@gmail.com](mailto:afatunmasimoglu@gmail.com)

Национальное аэрокосмическое агентство,  
Баку, 1115, Азербайджанская Республика

## Аннотация

**Актуальность.** Системы открытой лазерной атмосферной связи подвергнуты воздействию погодных условий. Вопросам влияния дождей на эффективность открытой лазерной атмосферной связи посвящено большое количество модельных теоретических и экспериментальных исследований. Вместе с тем до сих пор не рассмотрена проблема выбора показателей открытой лазерной атмосферной оптической связи звездообразной структуры с учетом необходимости минимизации потерь сигнала.

**Целью** проводимого исследования является разработка методики оптимизации звездообразной структуры открытой лазерной атмосферной связи в интересах минимизации суммарных потерь оптического сигнала из-за ограничений видимости на множестве расстояний между центром и периферийными узлами.

**Сущность метода** заключается в составлении и решении вариационной оптимизационной задачи по оценке суммарных потерь по всем направлениям звездообразной структуры системы передачи данных с использованием выбранной известной модели ослабления оптического сигнала из-за воздействия дождя (в этой модели в явном виде фигурирует показатель видимости на дистанциях от центра до периферийного узла).

**Эксперименты.** Проведенные апробационные экспериментальные исследования в целом подтвердили достоверность моделей, взятых за основу проводимого исследования.

**В результате** проведенных теоретических модельных исследований получено выражение для вычисления максимально достижимых суммарных потерь оптического сигнала в звездообразной структуре открытой лазерной атмосферной сети связи. Кроме того, выявлено, что в звездообразной структуре открытой лазерной атмосферной связи максимальные суммарные потери оптического сигнала в случае принятия интегрального ограничения на вновь введенную функциональную зависимость между дистанциями от периферийного узла до центра и локальной видимостью возникают в том случае, когда расстояние от передающего центра до периферийных узлов приема пропорциональны квадратному корню локальной видимости.

**Практическая значимость.** На базе полученных результатов выработаны рекомендации по определению дистанции установки узлов приема от центра. Намечается реализация полученных результатов в проектируемой открытой лазерной атмосферной сети связи «Центр – пригородные узлы» на Апшеронском полуострове.

**Ключевые слова:** дождевые осадки, оптимизация, потери оптического сигнала, атмосфера, лазерная связь


**Ссылка для цитирования:** Маммадов А.М. Оптимизация влияния дождевых осадков на эффективность работы открытой лазерной атмосферной связи // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 62–67. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-62-67. EDN:RLJIOJ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-62-67>

EDN:RLJIOJ

# Optimization the Effect of Rainfall on the Efficiency of Open Laser Atmospheric Communication

 Aflatun M. Mammadov, aflatunmasimoglu@gmail.com

National Aerospace Agency,  
Baku, 1115, Republic of Azerbaijan

## Annotation

**Relevance.** Open laser atmospheric communication systems are affected by weather conditions. A large number of model theoretical and experimental studies have been devoted to the influence of rains on the effectiveness of open laser atmospheric communication. However, the issue of choosing the parameters of an open laser atmospheric optical communication system with a star-shaped structure, taking into account the need to minimize signal loss, has not yet been considered.

**The aim of the study** is to develop a method for optimizing the star-shaped structure of open laser atmospheric communication in order to minimize the total loss of the optical signal due to visibility limitations at many distances between the center and peripheral nodes.

**The essence of the method** consists in compiling and solving a variational optimization problem for estimating the total losses in all directions of the star-shaped structure of the data transmission system using a selected well-known model of attenuation of the optical signal due to the effect of rain (in this model, the visibility indicator at distances from the center to the peripheral node is explicitly included).

**Experiments.** The conducted **approbation experimental** studies have generally confirmed the reliability of the models used as the basis of the conducted research.

As a **result** of theoretical model studies, an expression was obtained for calculating the maximum achievable total optical signal losses in star-shaped open laser atmospheric communication networks. In addition, it was found that in the star-shaped structure of open laser atmospheric communication, the maximum total losses of the optical signal in the case of accepting the integral constraint on the newly introduced functional dependence between the distances from the peripheral node to the center and local visibility occur in the case when the distance from the transmitting center to the peripheral receiving nodes is proportional to the square root of local visibility.

**Practical significance.** Based on the results obtained, recommendations have been developed for determining the distance of the reception nodes from the center. It is planned to implement the results obtained in the projected open laser atmospheric communication network "Center-suburban hubs" on the Absheron Peninsula.

**Keywords:** rainfall, optimization, optical signal loss, atmosphere, laser communication

**For citation:** Mammadov A.M. Optimization the Effect of Rainfall on the Efficiency of Open Laser Atmospheric Communication. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(6):62–67. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-62-67. EDN:RLJIOJ

## Введение

Как отмечается в работе [1] системы открытой лазерной атмосферной связи подвергнуты влиянию погодных условий. Основными погодными факторами, влияющими на качество открытой лазерной атмосферной связи, являются туман и осадки. Вопросам влияния дождей на эффективность открытой атмосферной связи посвящена обширная литература (см., например, [2–6]). В ра-

боте [2] исследована проблема зависимости максимальной дальности связи и степени ослабления оптического сигнала в таких системах от интенсивности осадков. В [3] показаны результаты исследования влияния дождей на прохождение по открытой атмосферной линии оптического луча длиной волны 810 нм на расстоянии 700 м. Согласно этим результатам, потери сигнала увеличивались с усилением интенсивности дождя. В

работе [4] предлагается модель для вычисления степени ослабления сигнала в системе открытой лазерной атмосферной связи с учетом закона распределения дождевых капель по размерам.

В общем случае, как отмечается в работе [5], ослабление оптического сигнала из-за дождя определяется по формуле:

$$\tau_{\text{rain}} = \exp(-(0,05556 + 0,00848R - 3,66 \cdot 10^{-5} \cdot R^2)l), \quad (1)$$

где  $R$  – интенсивность дождя;  $l$  – дистанция.

В работе [6] была поставлена задача оптимального выбора дистанций расположения приемных узлов от центрального узла в звездообразной структуре системы открытой лазерной атмосферной связи в зависимости от интенсивности дождей в зоне функционирования всей системы.

Вместе с тем, до сих пор не решена проблема выбора показателей открытой лазерной атмосферной оптической связи звездообразной структуры с учетом минимизации потерь сигнала. В интересах поиска этого решения прежде всего рассмотрим более детально модели учета потерь сигнала из-за осадков, изложенные в [2–4].

### Существующие модели

Как отмечается в работе [2], потери оптического сигнала в рассматриваемых системах не зависят от длины волны и определяются по формуле:

$$\delta_{\text{rain}} = \frac{2,9}{V}, \quad (2)$$

$$L_{\text{rain}} = 10 \log(\exp(-\delta_{\text{rain}} \cdot d)), \quad (3)$$

где  $L_{\text{rain}}$  – потери из-за дождя (дБ);  $V$  – видимость;  $\delta_{\text{rain}} = 2,9/V$  – коэффициент ослабления (1/км);  $d$  – дистанция от излучателя до приемного узла.

На рисунке 1 приведен график зависимости ослабления от интенсивности дождя.

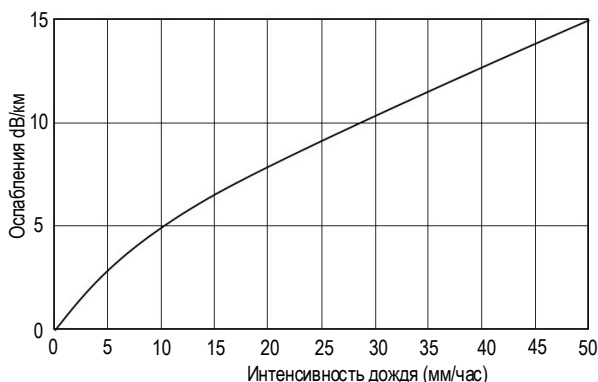


Рис. 1. График зависимости ослабления оптического сигнала в системах открытой лазерной атмосферной связи от интенсивности дождя [2]

Fig. 1. Graph of the Dependence of Optical Signal Attenuation in Open Laser Atmospheric Communication Systems on Rain Intensity [2]

В работе [2] также изложена эмпирическая модель для вычисления степени ослабления оптического сигнала из-за влияния дождей –  $A$  (дБ/км), согласно которой:

$$A = 1,076 \cdot K^{0,67}. \quad (4)$$

При этом суммарные потери на дистанции длиной  $d$  определяются как:

$$L_{\text{rain}} = A \cdot d = 1,076 \cdot K^{0,67} \cdot d. \quad (5)$$

В работе [3] приведена подобная формулировка степени ослабления оптического сигнала из-за влияния дождей:

$$A = k \cdot R^{\alpha}, \quad (6)$$

где коэффициенты  $k$  и  $\alpha$  зависят от характеристик дождя и могут быть определены экспериментальным путем; в таблице 1 приведены их значения, измеренные в Японии и Франции.

ТАБЛИЦА 1. Значения  $k$  и  $\alpha$ , измеренные в разных странах

TABLE 1. Values of  $k$  and  $\alpha$  Measured in Different Countries

Страны	$k$	$\alpha$
Япония	1,58	0,63
Франция	1,076	0,67

В работе [4] представлены модель Аин и модель Мопфема. Согласно первой, если в течение года процент дождей с интенсивностью  $R$  превышает значение  $P$ , то степень ослабления из-за таких дождей может быть вычислена по выражению:

$$A(P) = k \cdot R(P)^{\alpha} \cdot Lr, \quad (7)$$

где  $L$  – длина пути прохождения оптического луча от центра до периферийного узла;  $r$  – фактор сокращения этого пути:

$$r = \frac{1}{1 + L/L(R)}, \quad (8)$$

$$L(R) = \frac{2623}{R(P) - 6,2}. \quad (9)$$

В модели Мопфема допускается, что интенсивность дождя равна  $R = 0,01$ , и при заданной вероятности  $P$  за год вычисляется степень ослабления:

$$A(P) = k \cdot R_{0,01}^{\alpha} \log(P, L), \quad (10)$$

где

$$\log(P, L) = \text{LexP} \left( -\frac{R(P)}{1 - 100R(P)} \right), \quad (11)$$

при этом выражение (10) верно, если  $L \leq 7$  км.

Вместе с тем, все рассмотренные выше модели характеризуют случай моделирования систем с одним передатчиком и одним приемником.

Для звездообразных структур систем открытой лазерной атмосферной связи (рисунок 2), где используется один передающий узел и  $n$  приемных

узлов, применение указанных моделей проблематично, т.к. требует большого количества вычислений. Если учесть, что такие вычисления в конечном случае преследуют цель построения оптимальной модели, то актуальной оказывается разработка методики оптимизации звездообразных структур систем открытой атмосферной оптической связи (решение оптимизационной задачи с целью минимизации суммарных потерь оптического сигнала из-за ограниченной видимости на множестве расстояний между центром и периферийными узлами).

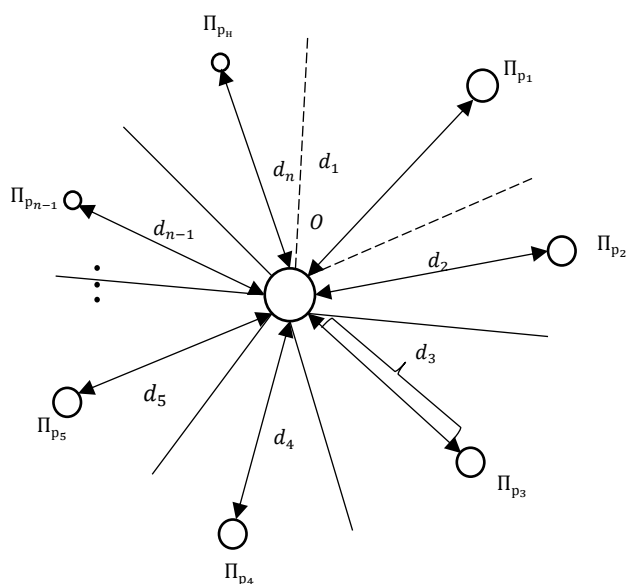


Рис. 2. Звездообразная структура открытой лазерной атмосферной оптической связи

Fig. 2. Star-Shaped Structure of an Open Laser Atmospheric Optical Communication System

### Предлагаемое решение

В качестве модели оптимизации выберем (3), так как именно в этой модели явно фигурирует показатель видимости на множестве дистанций от центра до периферийных узлов.

Рассмотрим множество дистанций  $d_i$  – расстояний между периферийными узлами  $i$  и центральным узлом  $O$  – используемых в системе:

$$D = \{d_i\}, i = 1, n \quad (12)$$

где

$$d_i = d_{i-1} + \Delta d, \Delta d = \text{const}. \quad (13)$$

При этом условия (12) и (13) не означают равенство расстояний от центра до периферийных узлов; здесь речь идет о равенстве приращений этих расстояний.

Модель (3) с учетом (2) представим в следующем виде:

$$L_{\text{rain}} = 10 \log \left[ \exp \left( \frac{1}{\delta_{\text{rain}} \cdot d} \right) \right], \quad (14)$$

или

$$L_{\text{rain}} = 10 \log \left[ \frac{1}{\exp \left( \frac{V}{2,9 \cdot d} \right)} \right]. \quad (15)$$

Таким образом, (15) можно записать в виде выражения:

$$L_{\text{rain}} = \frac{c_1 \cdot v}{2,9 \cdot d}, \quad c_1 = \text{const}. \quad (16)$$

Постоянная  $c_1$  определяется как:

$$c_1 = 10 \cdot C_0, \quad (17)$$

где  $C_0$  – постоянная, возникающая из-за наличия основания логарифма в (15) и  $e = 2,7$ .

Введем на рассмотрение функциональную связь между  $d_i$  и  $v_i$ , где  $v_i$  – видимость в секторе, характеризуемом дистанцией  $d_i$ .

При этом предполагаем существование упорядоченного множества:

$$V = \{v_i\}, i = \overline{1, n}, \quad (18)$$

где

$$v_i = v_{i-1} + \Delta v, \Delta v = \text{const}, \quad (19)$$

$$d_2 = \psi(v_i). \quad (20)$$

На базе выражений (18) и (20) построим следующий дискретный функционал цели  $F_1$ , который должен быть сведен к минимуму путем подбора функции (20):

$$F_1 = \sum_{i=1}^n - \frac{c_1 \cdot v_i}{2,9 \cdot \psi(v_i)}. \quad (21)$$

От вышеизложенной дискретной модели условно перейдем на непрерывную модель.

В этом случае функционал  $F_1$  принимает следующий вид:

$$F_{1n} = \int_{\gamma}^{v_{\max}} - \frac{c_1 \cdot v}{2,9 \cdot \psi(v)} dv. \quad (22)$$

Для вычисления оптимального вида функции  $\psi(v)$  введем на нее следующее интегральное ограничение:

$$\int_{\gamma}^{v_{\max}} \psi(v) dv = C_0, C_0 = \text{const}. \quad (23)$$

С учетом выражений (22) и (23) сформируем целевой функционал безусловной вариационной оптимизации  $F_2$ :

$$F_2 = - \int_0^{\tau_{\max}} \frac{c_1 \cdot v}{2,9 \cdot \psi(v)} dv - \lambda \left[ \int_0^{\tau_{\max}} \psi(v) dv - c \right], \quad (24)$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

Согласно методу Эйлера, решение оптимизационной задачи (24) удовлетворяет условию:

$$\frac{\left\{ \frac{c_1 \cdot v}{2,9 \cdot \psi(v)} - \lambda \psi(v) \right\}}{d\psi(\lambda)} = 0. \quad (25)$$

Из условия (25) получаем:

$$\frac{c_1 \cdot v}{2,9 \cdot \psi^2(v)}, \lambda = 0. \quad (26)$$

$$\psi(v) = \sqrt{\frac{c_1 \cdot v}{2,9 \cdot \lambda}}. \quad (27)$$

При решении (27)  $F_2$  достигает максимума, что легко проверить по критерию Лагранжа. Согласно этому критерию применительно к рассматриваемой задаче, если производная выражения (26) по функции  $\psi(v)$  оказывается отрицательной величиной, то  $F_2$  при полученном решении достигает максимума. Для вычисления значения  $\lambda$  можно воспользоваться выражениями (23) и (27).

### Обсуждение

Таким образом, рассмотрена и решена задача минимизации потерь оптического сигнала из-за ограниченной видимости в открытой лазерной атмосферной системе связи звездообразной структуры. Сформирована вариационная оптимизационная задача оценки суммарных потерь по всем направлениям звездообразной структуры системы.

С учетом выражений (27) и (22) вычислим максимальную достижимую величину суммарных потерь:

$$F_{1n} = \int_{\gamma}^{\gamma_{\max}} \frac{c_1 \cdot v}{2,9 \cdot \sqrt{\frac{c_1 \cdot v}{2,9 \cdot \lambda_{\alpha}}}} dv, \quad (28)$$

где  $\lambda_{\alpha}$  – вычисленное на базе выражений (23) и (27) значение  $\lambda$ .

### Список источников

1. Mazin A.A., Ali A. Performance Analysis of Fog Effect on Free Space Optical Communication System // IOSR Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 7. Iss. 2. PP. 16–24. DOI:10.9790/4861-07211624
2. Twati M.O., Badi M.M., Adam A.F. Analysis of Rain Effects on Free Space Optics Based on Data Measured in the Libyan Climate // International Journal of Information and Electronics Engineering. 2014. Vol. 4. Iss. 6. DOI:10.7763/IJIEE.2014.V4.485
3. Mustafa F.H., Supaat S.M., Charde N.M. Effect of Rain Attenuations on Free Space Optic Transmission in Kuala Lumpur // Proceeding of the International Conference on Advanced Science, Engineering and Information Technology 2011 (Bangi, Malaysia, 14–15 January 2011). 2011. DOI:10.18517/ijaseit.1.4.70
4. Korai U.A., Luini L., Nebuloni R. Model for the Prediction of Rain Attenuation Affecting Free Space Optical Links // Electronics. 2018. Vol. 7. Iss. 12. P. 407. DOI:10.3390/electronics7120407
5. Forin D.M., Incerti G., Beleffi G.M.T., Teixeira A.L.J., Costa L.N., Andre P.S.B., et al. Free space optical technologies // In: Bouras C.J. (ed.) Trends in Telecommunications Technologies. 2010. PP. 257–296. URL: [http://book.itop.ru/depositary/opto\\_commun/InTech-Free\\_space\\_optical\\_technologies.pdf](http://book.itop.ru/depositary/opto_commun/InTech-Free_space_optical_technologies.pdf) (Accessed 09.12.2025)
6. Маммадов А.М., Ибрагимов А.Э.Г. Вопросы учета атмосферных и метеорологических факторов при построении систем открытой атмосферной оптической связи // Телекоммуникации и связь. 2025. № 3(6). С. 65–69. DOI:10.21681/3034-4050-2025-3-65-69. EDN:VLSRW

Из выражения (28) получаем минимальные потери сигнала в системе:

$$F_{1n\min} = \frac{2 \cdot \sqrt{c_1}}{3\sqrt{2,9}} \cdot \int_0^{\gamma_{\max}} \sqrt{v} \sqrt{\lambda_{\alpha}} dv = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{c_1 \cdot \lambda_{\alpha}}{2,9}} \cdot \gamma_{\max}^{\frac{3}{2}}.$$

Видно, что максимальные потери сигнала в системе ( $F_{1n}$ ) возможны в том случае, когда дистанции от передающего центра до периферийных узлов приема пропорциональны квадратному корню локальной видимости.

В теоретическом плане адекватность предложенной модели оптимизации (24) обеспечивается тем, что она основана на известной классической модели (3) и на решении классической вариационной задачи. В экспериментальном плане намечается реализация полученных результатов в проектируемой открытой лазерной атмосферной сети связи «Центр – пригородные узлы» на Апшеронском полуострове. Исследование такой сети позволит экспериментально проверить адекватность полученных в настоящей статье теоретических результатов.

### Заключение и основные выводы

Показано, что в звездообразной структуре открытой лазерной атмосферной связи максимальные суммарные потери оптического сигнала в случае принятия интегрального ограничения на вновь введенную функциональную зависимость между дистанциями от периферийного узла до центра и локальной видимостью возникают в том случае, когда дистанции от передающего центра до периферийных узлов приема пропорциональны квадратному корню локальной видимости.

На основании вышеуказанного заключения сделан вывод о нецелесообразности установки узлов приема на определяемой выражением (27) дистанции от центра до периферийных узлов.




## References

1. Mazin A.A., Ali A. Performance Analysis of Fog Effect on Free Space Optical Communication System. *IOSR Journal of Applied Physics*. 2015;7(2):16–24. DOI:10.9790/4861-07211624
2. Twati M.O., Badi M.M., Adam A.F. Analysis of Rain Effects on Free Space Optics Based on Data Measured in the Libyan Climate. *International Journal of Information and Electronics Engineering*. 2014;4(6). DOI:10.7763/IJIEE.2014.V4.485
3. Mustafa F.H., Supaat S.M., Charde N.M. Effect of Rain Attenuations on Free Space Optic Transmission in Kuala Lumpur. *Proceeding of the International Conference on Advanced Science, Engineering and Information Technology 2011, 14–15 January 2011, Bangi, Malaysia*. 2011. DOI:10.18517/ijaseit.1.4.70
4. Korai U.A., Luini L., Nebuloni R. Model for the Prediction of Rain Attenuation Affecting Free Space Optical Links. *Electronics*. 2018;7(12):407. DOI:10.3390/electronics7120407
5. Forin D.M., Incerti G., Beleffi G.M.T., Teixeira A.L.J., Costa L.N., Andre P.S.B., et al. Free space optical technologies. In: Bouras C.J. (ed.) *Trends in Telecommunications Technologies*. 2010. p.257–296. URL: [http://book.itpe.ru/depository/opto\\_commun/InTech-Free\\_space\\_optical\\_technologies.pdf](http://book.itpe.ru/depository/opto_commun/InTech-Free_space_optical_technologies.pdf) [Accessed 09.12.2025]
6. Memmedov A.M., Ibragimov A.E. Issues of Taking into Account Atmospheric and Meteorological Factors in the Construction of Open Atmospheric Systems Optical Communication. *Telekommunikacii i svyaz*. 2025;3(6);65–69. (in Russ.) DOI:10.21681/3034-4050-2025-3-65-69. EDN:VLSPRW

Статья поступила в редакцию 27.09.2025; одобрена после рецензирования 18.11.2025; принята к публикации 04.12.2025.

The article was submitted 27.09.2025; approved after reviewing 18.11.2025; accepted for publication 04.12.2025.

## Информация об авторе:

**МАММАДОВ** | аспирант Национального аэрокосмического агентства (Азербайджанская Республика)  
**Афлатун Масим** |  <https://orcid.org/0009-0000-5355-0493>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.