Научная статья
УДК 539.143
https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-2-49-55
EDN:YRLSIN

CC BY 4.0

Оптимальный выбор диаметра лазерного луча в атмосферных сетях связи распределенного и мобильного типа

Афлатун Масим Маммадов, aflatunmasimoglu@gmail.com

Азербайджанский государственный экономический университет,
Баку, 1001, Азербайджан

Аннотация

Актуальность. *Стремительное развитие технологии интернета вещей привело к экспоненциальному росту количества различных интеллектуальных технических средств, присоединяемых к интернету, что, в свою очередь, способствовало появлению большого объема данных, подлежащих передаче по системам связи. Электромагнитные сети связи обладают недостаточным потенциалом для решения данной задачи, наиболее эффективными здесь оказываются оптические системы передачи информации по атмосферным каналам. Однако оптические атмосферные системы связи подвержены влиянию атмосферных факторов, т. к. из-за поглощения, рассеяния и дифракции лазерный луч ослабляется по мощности и подвергается уширению. В исследуемой предметной области известны работы, посвященные расходимости луча, где рассматривается вопрос зависимости величины максимальной расходимости луча от таких показателей, как мощность лазерного источника, геометрическая длина канала, длина волны оптической радиации. Вместе с тем, в указанных работах рассматривается один канал лазерной сети связи, а вопрос о выборе диаметра лазерного луча во всех каналах лазерной многоканальной атмосферной сети не обсуждается.*

Цель. *Сформулирована задача оптимального выбора диаметра лазерного пучка в многоканальной системе атмосферной оптической связи распределенного типа с учетом расходимости луча. В отличие от известных работ, в которых решается задача оптимизации с учетом влияния расходимости луча, решение поставленной цели охватывает как стационарные, так и мобильные варианты реализации каналов сети всей многоканальной системы.* ***Решение*** *поставленной задачи осуществлено путем формирования единого целевого функционала и дальнейшей оптимизации для выявления оптимальной взаимосвязи между величиной радиуса луча на входе приемника канала и радиусом луча на выходе излучателя при подаче на рассматриваемый атмосферный канал с учетом возможности его уширения. Показано, что такое расширение диаметра лазерного луча по выявленному оптимальному закону позволяет достичь максимума средней величины интенсивности лазерного луча, переданного по атмосферному каналу ко всем приемникам системы. Проведенные* ***модельные исследования*** *предложенной методики учета уширения диаметра луча подтвердили возможность получения оптимального соотношения между основными показателями многоканальной лазерной атмосферной сети.*

Научная новизна. *Разработана математическая модель оптимизации выбора диаметра луча в многоканальной лазерной атмосферной сети.*

Теоретическая и практическая значимость. *Оптимизация предложенной модели позволила получить рациональное соотношение между основным показателями многоканальной лазерной атмосферной сети распределенного типа, что может найти применение при построении подобных систем.*

Ключевые слова: *оптимизация, расходимость луча, моделирование, атмосферная связь, интенсивность луча*

Ссылка для цитирования: Маммадов А.М. Оптимальный выбор диаметра лазерного луча в атмосферных сетях связи распределенного и мобильного типа // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 2. С. 49–55. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-2-49-55. EDN:YRLSIN

© Маммадов А.М., 2025

Original research
https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-2-49-55
EDN:YRLSIN

Optimal Choice of Laser Beam Diameter in Atmospheric Communication Networks of Distributed and Mobile Type

Aflatun M. Mammadov, aflatunmasimoglu@gmail.com

Azerbaijan State Economic University,
Baku, 1001, Azerbaijan

Annotation

Relevance*. The rapid development of the Internet of Things technology has led to an exponential increase in the number of different intelligent hardware connected to the Internet, which, in turn, has contributed to the emergence of a large amount of data to be transmitted over communication systems. Electromagnetic communication networks have insufficient potential to solve this problem, and optical information transmission systems via atmospheric channels are one of the real options for solving this problem. However, optical atmospheric communication systems are subject to the influence of atmospheric factors, i.e. due to absorption, scattering, and diffraction, the laser beam is weakened in power and broadens. In well-known works on the divergence of the beam, the question of the dependence of the maximum divergence of the beam on such indicators as the power of the laser source, the geometric length of the channel, and the wavelength of optical radiation is investigated. At the same time, in these works, one channel of the laser communication network is considered, and the question of choosing the diameter of the laser beam in all channels of the laser multichannel atmospheric network is not discussed.*

Purpose*. The problem of optimal choice of the diameter of a laser beam in a multichannel atmospheric optical communication system of a distributed type is formulated, taking into account the divergence of the beam.*

The essence *of the proposed solution, unlike well-known works that solve the optimization problem taking into account the influence of beam divergence, the solution to this goal covers both stationary and mobile versions of the network channels of the entire multichannel system. The task was solved by forming a single target functional and further optimizing it in order to identify the optimal relationship between the radius of the beam at the input of the channel receiver and the radius of the beam at the output of the radiator when applied to the atmospheric channel under consideration, taking into account the possibility of its broadening. It is shown that such an expansion of the diameter of the laser beam, according to the optimal law identified, makes it possible to achieve a maximum of the average intensity of the laser beam transmitted through the atmospheric channel to all receivers of the system. The conducted* ***model studies*** *of the proposed method for accounting for beam diameter broadening confirmed the possibility of obtaining an optimal ratio between the main indicators of a multichannel laser atmospheric network.*

Scientific novelty. *A mathematical model for optimizing the choice of beam diameter in a multichannel laser atmospheric network has been developed.*

Theoretical and practical significance. *Optimization of the proposed model made it possible to obtain an optimal ratio between the main indicators of a multi-channel laser atmospheric network of a distributed type, which can be used in the construction of such systems.*

Keywords: *optimization, beam divergence, modeling, atmospheric coupling, beam intensity*

For citation: Mammadov A.M. Optimal Choice of Laser Beam Diameter in Atmospheric Communication Networks of Distributed and Mobile Type. *Proceedings of Telecommunication Universities.* 2025;11(2):49–55. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-2-49-55. EDN:YRLSIN

Введение

Развитие сетей связи диктует необходимость создания коммуникационных структур, отличающихся высокими показателями пропускания, безопасности, малым потреблением энергии, способностью создания связи со многими устройствами. Примером тому являются сети 5G, обеспечивающие высокую скорость коммуникации по сравнению с

существующими беспроводными сетями связи [1, 2]. Как отмечается в работах [3, 4], в следующем поколении мобильный связи (6G) терагерцовые антенны будут реализованы в виде малогабаритных деталей, и здесь могут быть применены средства открытой атмосферной связи.

Согласно [5–8], интернет вещей является концепцией, позволяющей контролировать ресурсы и осуществлять коммуникацию в реальном времени в различных сферах, таких как бизнес, промышленность, медицина и т. д. Быстрое развитие интернета вещей привело к экспоненциальному росту количества различных интеллектуальных технических средств, присоединяемых к интернету, что, в свою очередь, привело к появлению большого массива данных, подлежащих передаче по системам связи. Для решения данной задачи электромагнитные сети связи обладают недостаточным потенциалом, и одним из реальных вариантов для устранения указанной проблемы являются оптическая система передачи информации по атмосферным каналам [9–10]. Вместе с тем, такие оптические системы связи подвержены влиянию атмосферных факторов, т. к. из-за поглощения, рассеяния и дифракции лазерный луч ослабляется по мощности и подвергается уширению по диаметру [11, 12]. В связи с малой высотой трассы прохождения лазерного луча считается, что турбулентность атмосферы отсутствует. Расходимость луча привела к появлению относительно большого количества работ по оптимизации таких систем [13–20]. В этих работах исследуется вопрос зависимости величины максимальной расходимости луча от таких показателей, как мощность лазерного источника, геометрическая длина канала, длина волны оптической радиации. Вместе с тем, в указанных работах рассматривается один канал лазерной сети связи, а вопрос о выборе диаметра лазерного луча во всех каналах лазерной многоканальной атмосферной сети не обсуждается. В настоящей работе сформулирована и решена задача оптимального выбора диаметра лазерного луча во взаимосвязи с основными параметрами многоканальной сети атмосферной оптической связи, результаты которой могут быть использованы как в стационарных, так и мобильных реализациях сети.

Материалы и методы

Прежде всего рассмотрим существующие модели, используемые для оценки влияния уширения луча на показатели систем оптической атмосферной связи [21]. При создании систем оптической атмосферной связи учет расхождения луча имеет особую важность, т. к. из-за дифракции света оптический луч подвергается уширению, не достигая апертуры приемника. Как результат, появляются потери сигнала из-за расходимости, по причине превышения диаметра луча размера апертуры приемника. Кроме этих потерь, также существуют потери нацеливания луча из-за смещения последнего относительно оптической оси нацеливания на приемник. Указанные потери диктуют необходимость проведения анализа изменения интенсивности луча по радиальному направлению поперечного сечения луча.

Согласно [22], для характеристики лазерного луча на расстоянии $z = L$ используются такие показатели, как параметр кривизны $\varphi_0(L)$ и отношение Френеля $\Omega_0(L)$, определяемые как:

$$\varphi_0(L) = 1 - \frac{L}{C_0}, \quad (1)$$

$$\Omega_0(L) = \frac{2L}{kR_0^2}, \quad (2)$$

где R_0 – радиус луча на определенной дистанции, вычисляемый как расстояние от центральной точки поперечного сечения до такой радиальной точки, где интенсивность уменьшается до величины $\left(\frac{1}{e}\right) \cdot I_0$, I_0 – максимальная интенсивность луча в центре; C_0 – радиус кривизны; k – волновое число, определяемое с помощью выражения:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

где λ – длина волны.

При этом уширение оптического луча оценивается как:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi R_B}, \quad (4)$$

где R_B – минимальная величина радиуса луча, определяемая выражением:

$$R_B = \frac{R_0}{\left[\left(\frac{kR_0^2}{2C_0}\right)^2 + 1\right]^{1/2}}. \quad (5)$$

Согласно [21] интенсивность оптического луча на радиальном расстоянии r от оптической оси определяется как:

$$I(r, L) = \frac{I_0 R_0^2}{R^2(L)} \exp\left[-\frac{2r^2}{R^2(L)}\right], \quad (6)$$

где $R(L)$ – радиус луча на дистанции L, определяемый выражением:

$$R(L) = R_0[\varphi^2(L) + \Omega_0^2(L)]^{1/2}. \quad (7)$$

Согласно [21] мощность оптического луча (P_0) и интенсивность оптической волны при $r = 0$ связаны соотношением:

$$I(0, L) = \frac{2P_0}{\pi R^2(L)}. \quad (8)$$

При этом, на практике выполняется условие $\varphi_0 \gg \Omega_0$, вследствие чего уравнение принимает следующий вид [3]:

$$R(L) = R_0 + L\theta. \quad (9)$$

С учетом вышеизложенных исходных материалов *задача исследования формируется следующим образом*: рассматривается система оптической атмосферной связи, в которой показатель L (расстояние от передатчика до приемника) изменяется в пределах $L_{\min}$ до $L_{\max}$. Это условие может быть реализовано при рассмотрении двух типов систем.

Первый тип системы. Распределенная стационарная система оптической атмосферной связи, где использован один передатчик и n количество стационарных приемников (рисунок 1). В этой структуре L изменяется в пространстве.

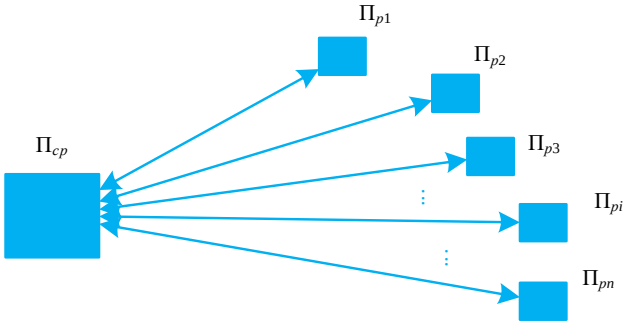

Рис. 1. Структура системы атмосферной связи, где показатель L изменяется в пространстве

Fig. 1. The Structure of the Atmospheric Communication System, Where the Parameter L Varies in Space

Второй тип системы. Система мобильной оптической атмосферной связи, где показатель L изменяется во времени. Например, неподвижный передатчик поддерживает связь с мобильными приемниками, расстояние между которыми изменяется во времени, т. е. $L = L(t)$ (рисунок 2).

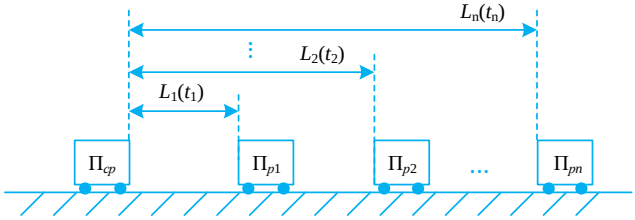

Рис. 2. Структура оптической мобильной атмосферной связи, где приемник, удаляясь от передатчика в моменты $t_1, t_2, \ldots t_n$, занимает позиции $\text{п}_{p1}, \text{п}_{p2}, \ldots, \text{п}_{pn}$ на расстояниях $L_1(t_1), L_2(t_2), \ldots, L_n(t_n)$

Fig. 2. The Structure of Optical Mobile Atmospheric Communication, Where the Receiver, Moving Away from the Transmitter at Momentst$_1$, t_2, … t_n, Occupies Positions $\text{п}_{p1}, \text{п}_{p2}, \ldots, \text{п}_{pn}$ at Distances $L_1(t_1), L_2(t_2), \ldots, L_n(t_n)$

При этом приемник оповещает передатчик о текущем месторасположении. Допускается, что за время сеанса связи мобильный приемник проходит дистанцию, длина которой намного меньше расстояния между передатчиком и приемником, т. е. может быть не учтена. Следует определить такое оптимальное соотношение между показателями r, L, R_0 и θ, при котором интенсивность луча достигла бы максимума в среднем на входах всех приемников.

Для решения поставленной задачи на базе выражения (6) определим функционал цели F:

$$F = \frac{1}{L_{\max}} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \frac{I_0 R_0^2}{R^2(L)} \exp\left[-\frac{2r^2(L)}{R^2(L)}\right] dL. \quad (10)$$

При этом имеется ввиду, что показатель r может быть изменен в зависимости от L. Вычислим $R(L)$, при котором F достиг бы максимальной величины. Согласно [5] оптимальная функция $R(L)$ при этом удовлетворяет условию:

$$\frac{d\left\{\frac{I_0 R_0^2}{R^2(L)} \exp\left[-\frac{2r^2(L)}{R^2(L)}\right]\right\}}{dR(L)} = 0. \quad (11)$$

Из условия (11) получаем:

$$-\frac{I_0 R_0^2}{R^2(L)} + \frac{I_0 R_0^2}{R^2(L)} \cdot \frac{2r^2(L)}{R^2(L)} = 0. \quad (12)$$

Проведя сокращения в (12), находим:

$$R(L) = \sqrt{2} r(L). \quad (13)$$

Исходя из (13), функционал (10) достигает максимума, что легко проверить, вычислив показатель Лагранжа (α):

$$\alpha = \frac{d^2\left\{\frac{I_0 R_0^2}{R^2(L)} \exp\left[-\frac{2r^2(L)}{R^2(L)}\right]\right\}}{dR(L)^2}, \quad (14)$$

знак которого оказывается отрицательным.

С учетом выражений (9) и (13) получаем:

$$R_0 + L\theta = \sqrt{2} r(L) \quad (15)$$

или

$$r(L) = \frac{R_0 + L\theta}{\sqrt{2}}. \quad (16)$$

Таким образом, при условии (13) целевой функционал (10) достигает максимума. Вычисленная оптимизационная функция (13) совместно с выражением (9) позволяет определить оптимальный закон уширения диаметра луча, при котором средняя величина интенсивности могла бы достичь максимальной величины. В отличие от результатов известных работ по оптимизации систем атмосферной оптической связи с учетом расходимости лазерного луча, полученное выражение позволяет оптимизировать многоканальную систему по фактору уширения луча путем реализации условия (16), которое, в свою очередь, приводит к оптимизации функционала цели F (10).

Модельные исследования

Проведем модельные расчеты на базе формулы (15). Допустим, что исходный радиус лазерного луча равен 1 мм, т. е. $R_{\text{ис}} = 1$ мм.

Вычислим R_0. Исходную интенсивность луча обозначим как $I_{0\text{исх}}$. При радиусе луча R_0 его интенсивность уменьшается до величины $\frac{I_{0\text{исх}}}{e}$. Интенсивность луча определим по выражению:

$$I_0 = \frac{P}{S}, \tag{17}$$

где P – сила света; S – площадь поперечного сечения луча.

Исходная интенсивность луча находится в следующем соотношении с указанными выше показателями:

$$kI_{0\text{исх}} = \frac{P}{S_{\text{исх}}}, \tag{18}$$

где k – коэффициент пропорциональности.

При достижении радиуса R_0 справедливо следующее соотношение:

$$\frac{kI_{0\max}}{e} = \frac{P}{S(L)}, \tag{19}$$

где $S(L)$ – площадь поперечного сечения луча.

Из (18) и (19) получим следующее соотношение:

$$\frac{P}{S_{\text{исх}}} = \frac{eP}{S(L)}. \tag{20}$$

Из (20) находим площадь поперечного сечения луча на расстоянии(L):

$$S(L) = eS_{\text{исх}}. \tag{21}$$

Из геометрии известно, что:

$$S(L) = \pi R_0^2. \tag{22}$$

Сравнивая (21) и (22) получим:

$$\pi R_0^2 = eS_{\text{исх}}, \tag{23}$$

или

$$R_0 = \sqrt{\frac{e}{\pi}S_{\text{исх}}} = \sqrt{\frac{2{,}71}{3{,}14}S_{\text{исх}}} = \\ = \sqrt{\frac{2{,}71 \cdot 3{,}14r^2}{3{,}14}} = 1{,}66r. \tag{24}$$

Для конкретного расчета примем следующие модельные данные: $\theta = 10\ \mu rad$; $L = 100$ м. С учетом выражения (16) вычислим оптимальный радиус:

$$r(L) = 1{,}66 + 100\text{ м} \cdot 10\ \mu rad = 1{,}66 + 2\text{ мм} = 3{,}66\text{ мм}.$$

Таким образом, согласно вышеизложенному при оптимальном радиусе $r(L) = 3{,}66$ мм, а также при $L = 100$ мм; $\theta = 10\ \mu rad$; $R_{\text{ис}} = 1$ мм, по критерию (10) на входы приемников в среднем поступит оптический сигнал максимальной интенсивности.

Обсуждение

Таким образом, поставлена и решена задача оптимизации атмосферной оптической связи многоканального типа, решение которой позволило осуществить оптимальный выбор диаметра луча. Полученное решение может быть распространено как на стационарные, так и мобильные варианты систем. В отличие от известных работ, в которых решается задача оптимизации одного канала связи с учетом влияния уширения луча, решение поставленной задачи, охватывающей всю многоканальную систему по данному фактору, осуществлено путем формирования единого целевого функционала и дальнейшей оптимизации с целью выявления оптимальной взаимосвязи между величиной радиуса луча на входе некоторого фиксированного приемника канала и радиусом луча на выходе излучателя с учетом его возможного уширения до подачи на этот канал.

Заключение

Показано, что уширение диаметра лазерного луча до подачи его в конкретный атмосферный канал по выявленному оптимальному закону позволяет достичь максимума средней величины интенсивности лазерного луча по каналам системы.

Разработан математический аппарат и модель оптимизации многоканальной лазерной атмосферной сети по фактору уширения диаметра луча.

Оптимизация предложенной модели учета уширения диаметра луча позволила получить оптимальное соотношение между основными показателями многоканальной лазерной атмосферной сети.

Список источников

1. Masud M., Gaba G.S., Choudhary K., Alroobaea R., Hossain M.S. A Robust and Lightweight Secure Access Scheme for Cloud Based E-Healthcare Services // Peer-to-Peer Networking and Applications. 2021. Vol. 14. Iss. 5. PP. 3043–3057. DOI:10.1007/s12083-021-01162-x. EDN:HOLGNG

2. Zhang Y., Ma X., Zhang J., Hossain M.S. Edge Intelligence in the Cognitive Internet of Things: Improving Sensitivity and Interactivity // IEEE Network. 2019. Vol. 33. Iss. 3. PP. 58–64. DOI:10.1109/MNET.2019.1800344

3. Harada R., Shibata N., Kaneko S., Imai T., Kani J.I., Yoshida T. Adaptive Beam Divergence for Expanding Range of Link Distance in FSO With Moving Nodes Toward 6G // IEEE Photonics technology letters. 2022. Vol. 34. Iss. 20. PP. 1061–1064. DOI:10.1109/LPT.2022.3199789

4. Sahoo P.K., Yadav A.K., Prajapati Y.K., Tripathi R. Optimum APD Gain Evaluation of FSO System for Inter-building Laser Communication Application // Select Proceedings of VCAS: Advances in VLSI, Communication, and Signal Processing. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer, 2020. Vol. 587. PP. 307–314. DOI:10.1007/978-981-32-9775-3_29

5. Ding J., Nemati M., Ranaweera C., Choi J. IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 67646–73. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2985932. EDN:PTUAHG

6. Liu T., Lu D. The application and development of IoT // Proceedings of the International Symposium on Information Technologies in Medicine and Education (Hokodate, Hokkaido, 03–05 August 2012). IEEE, 2012. Vol. 2. PP. 991–994. DOI:10.1109/ITiME.2012.6291468

7. Masud M., Alazab M., Choudhary K., Gaba G.S. 3P-SAKE: Privacy-Preserving and Physically Secured Authenticated Key Establishment Protocol for Wireless Industrial Networks // Computer Communications. 2021. Vol. 175. PP. 82–90. DOI:10.1016/j.comcom.2021.04.021. EDN:ODUELB

8. Gaba G.S., Kumar G., Kim T.-H., Monga H., Kumar P. Secure Device-to-Device communications for 5G enabled Internet of Things applications // Computer Communication. 2021. Vol. 169. PP. 114–128. DOI:10.1016/j.comcom.2021.01.010. EDN:URLIZU

9. Huang L., Liu S., Dai P., Li M., Chang G.-K., Shi Y. Unified Performance Analysis of Hybrid FSO/RF System with Diversity Combining // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38. Iss. 24. PP. 6788–6800. DOI:10.1109/JLT.2020.3018125. EDN:LTGOED

10. Bloom S., Hartley W. The last-mile solution: Hybrid FSO Radio. 2002. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/The-last-mile-solution%3A-Hybrid-FSO-Radio-Bloom-Hartley/d3ff29c18df55d5fb8baf4372adddc2399ceb121 (Accessed 28.03.2025)

11. Guiomar F.P., Lorences-Riesgo A., Ranzal D., Rocco F., Sousa A.N., Fernandes M.A., et al. Adaptive Probabilistic Shaped Modulation for High-Capacity Free-Space Optical Links // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38. Iss. 23. PP. 6529–6541. DOI:10.1109/JLT.2020.3012737. EDN:XYPJOZ

12. Rangan S., Rappaport T.S., Erkip E. Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges // Proceedings of the IEEE. 2014. Vol. 102. Iss. 3. PP. 366–385. DOI:10.1109/JPROC.2014.2299397

13. Zhao Z., Liao R., Zhang Y. Impact of Laser beam deverging angle on free-space optical communications // Proceedings of the Aerospace Conference (Big Sky, Montana, USA, 05–12 March 2011). IEEE, 2011. DOI:10.1109/AERO.2011.5747410

14. Killinger D. Free-Space Optics for Laser Communication Through the Air // Optics and Photonics News. 2002. Vol. 13. Iss. 10. PP. 36–42. DOI:10.1364/OPN.13.10.000036

15. Farid A., Hranilovic S. Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links with Pointing Errors // Journal of Lightwave Technology. 2007. Vol. 25. Iss. 7. PP. 1702–1710. DOI:10.1109/JLT.2007.899174

16. Ren Y., Dang A., Luo B., Guo H. Capacities for Long-Distance Free-Space Optics Links Under Beam Wander Effects // IEEE Photonics Technology Letters. 2010. Vol. 22. Iss. 14. PP. 1069–1071. DOI:10.1109/LPT.2010.2050468. EDN:ODHBUJ

17. Peppas K.P., Datsikas C.K. Average Symbol Error Probability of General-Order Rectangular Quadrature Amplitude Modulation of Optical Wireless Communication Systems Over Atmospheric Turbulence Channels // Journal of Optical Communications and Networking. 2010. Vol. 2. Iss. 2. PP. 102–110. DOI:10.1364/JOCN.2.000102

18. Arnon S. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless communication systems // Optics Letters. 2003. Vol. 28. Iss. 2. PP. 129–131. DOI:10.1364/OL.28.000129

19. García-Zambrana A., Castillo-Vázquez B., Castillo-Vázquez C. Asymptotic error-rate analysis of FSO links using transmit laser selection over gamma-gamma atmospheric turbulence channels with pointing errors // Optics Express. 2012. Vol. 20. Iss. 3. PP. 2096–2109. DOI:10.1364/OE.20.002096.

20. Mitsev T., Kolev N., Ivanov H., Dimitrov K. Optimum Divergence of the Transmitter Optical Radiation in FSO Systems // Proceedings of the 6th International Conference of Environmental Science and Technology (ICEST 2012, Veliko Tarnovo, Bulgaria, 28–30 June 2012). 2012.

21. Singh H., Miglsni R., Mittal N., Gaba G., Masud M., Aljahdali S. Design and analysis of commercially viable free-space optical communication link for diverse beam divergence profiles // Frontiers in Physics. 2021. Vol. 9. DOI:10.3389/fphy.2021.778734. EDN:UHUYWI

22. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham, Washington: SPIE, 2005. 783 p. DOI:10.1117/3.626196. EDN:YCTRZM

References

1. Masud M., Gaba G.S., Choudhary K., Alroobaea R., Hossain M.S. A Robust and Lightweight Secure Access Scheme for Cloud Based E-Healthcare Services. *Peer-to-Peer Networking and Applications*. 2021;14(5):3043–3057. DOI:10.1007/s12083-021-01162-x. EDN:HOLGNG

2. Zhang Y., Ma X., Zhang J., Hossain M.S. Edge Intelligence in the Cognitive Internet of Things: Improving Sensitivity and Interactivity. *IEEE Network*. 2019;33(3):58–64. DOI:10.1109/MNET.2019.1800344

3. Harada R., Shibata N., Kaneko S., Imai T., Kani J.I., Yoshida T. Adaptive Beam Divergence for Expanding Range of Link Distance in FSO With Moving Nodes Toward 6G. *IEEE Photonics technology letters*. 2022;34(20):1061–1064. DOI:10.1109/LPT.2022.3199789

4. Sahoo P.K., Yadav A.K., Prajapati Y.K., Tripathi R. Optimum APD Gain Evaluation of FSO System for Inter-building Laser Communication Application. *Select Proceedings of VCAS: Advances in VLSI, Communication, and Signal Processing. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol.587*. Singapore: Springer; 2020. p.307–314. DOI:10.1007/978-981-32-9775-3_29

5. Ding J., Nemati M., Ranaweera C., Choi J. IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey. *IEEE Access*. 2020;8: 67646–73. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2985932. EDN:PTUAHG

6. Liu T., Lu D. The application and development of IoT. *Proceedings of the International Symposium on Information Technologies in Medicine and Education, Hokodate, Hokkaido, 03–05 August 2012, vol.2*. IEEE; 2012. p.991–994. DOI:10.1109/ITiME.2012.6291468

7. Masud M., Alazab M., Choudhary K., Gaba G.S. 3P-SAKE: Privacy-Preserving and Physically Secured Authenticated Key Establishment Protocol for Wireless Industrial Networks. *Computer Communications*. 2021;175:82–90. DOI:10.1016/j.comcom.2021.04.021. EDN:ODUELB

8. Gaba G.S., Kumar G., Kim T.-H., Monga H., Kumar P. Secure Device-to-Device communications for 5G enabled Internet of Things applications. *Computer Communication*. 2021;169:114–128. DOI:10.1016/j.comcom.2021.01.010. EDN:URLIZU

9. Huang L., Liu S., Dai P., Li M., Chang G.-K., Shi Y. Unified Performance Analysis of Hybrid FSO/RF System with Diversity Combining. *Journal of Lightwave Technology*. 2020;38(24):6788–6800. DOI:10.1109/JLT.2020.3018125. EDN:LTGOED

10. Bloom S., Hartley W. *The last-mile solution: Hybrid FSO Radio*. 2002. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/The-last-mile-solution%3A-Hybrid-FSO-Radio-Bloom-Hartley/d3ff29c18df55d5fb8baf4372adddc2399ceb121 [Accessed 28.03.2025]

11. Guiomar F.P., Lorences-Riesgo A., Ranzal D., Rocco F., Sousa A.N., Fernandes M.A., et al. Adaptive Probabilistic Shaped Modulation for High-Capacity Free-Space Optical Links. *Journal of Lightwave Technology*. 2020;38(23):6529–6541. DOI:10.1109/JLT.2020.3012737. EDN:XYPJOZ

12. Rangan S., Rappaport T.S., Erkip E. Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges. *Proceedings of the IEEE*. 2014;102(3):366–385. DOI:10.1109/JPROC.2014.2299397

13. Zhao Z., Liao R., Zhang Y. Impact of Laser beam deverging angle on free-space optical communications. *Proceedings of the Aerospace Conference, 05–12 March 2011, Big Sky, Montana, USA*. IEEE; 2011. DOI:10.1109/AERO.2011.5747410

14. Killinger D. Free-Space Optics for Laser Communication Through the Air. *Optics and Photonics News*. 2002;13(10): 36–42. DOI:10.1364/OPN.13.10.000036

15. Farid A., Hranilovic S. Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links with Pointing Errors. *Journal of Lightwave Technology*. 2007;25(7):1702–1710. DOI:10.1109/JLT.2007.899174

16. Ren Y., Dang A., Luo B., Guo H. Capacities for Long-Distance Free-Space Optics Links Under Beam Wander Effects. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2010;22(14):1069–1071. DOI:10.1109/LPT.2010.2050468. EDN:ODHBUJ

17. Peppas K.P., Datsikas C.K. Average Symbol Error Probability of General-Order Rectangular Quadrature Amplitude Modulation of Optical Wireless Communication Systems Over Atmospheric Turbulence Channels. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2010;2(2):102–110. DOI:10.1364/JOCN.2.000102

18. Arnon S. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless communication systems. *Optics Letters*. 2003;28(2):129–131. DOI:10.1364/OL.28.000129

19. García-Zambrana A., Castillo-Vázquez B., Castillo-Vázquez C. Asymptotic error-rate analysis of FSO links using transmit laser selection over gamma-gamma atmospheric turbulence channels with pointing errors. *Optics Express*. 2012;20(3): 2096–2109. DOI:10.1364/OE.20.002096.

20. Mitsev T., Kolev N., Ivanov H., Dimitrov K. Optimum Divergence of the Transmitter Optical Radiation in FSO Systems. *Proceedings of the 6th International Conference of Environmental Science and Technology, ICEST 2012, 28–30 June 2012, Veliko Tarnovo, Bulgaria*. 2012.

21. Singh H., Miglsni R., Mittal N., Gaba G., Masud M., Aljahdali S. Design and analysis of commercially viable free-space optical communication link for diverse beam divergence profiles. *Frontiers in Physics*. 2021;9. DOI:10.3389/fphy.2021.778734. EDN:UHUYWI

22. Andrews L.C., Phillips R.L. *Laser Beam Propagation through Random Media*. Bellingham, Washington: SPIE; 2005. 783 p. DOI:10.1117/3.626196. EDN:YCTRZM

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 01.03.2025.
The article was submitted 27.01.2025; approved after reviewing 25.02.2025; accepted for publication 01.03.2025.

Информация об авторе:

МАММАДОВ Афлатун Масим
преподаватель кафедры цифровой коммуникаций и прикладной информатики Азербайджанского государственного экономического университета
https://orcid.org/0009-0000-5355-0493

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.
The author declares no conflicts of interests.