

УДК 621.391
EDN: VQLCIC

Выбор длины волны для оптической связи между космическими аппаратами

Былина М. С.¹ ✉, Глаголев С. Ф.¹, Гордийчук И. М.¹, Мельников С. В.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²ОАО «Супертел»,
Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

Постановка задачи. Оптические системы передачи между космическими аппаратами характеризуются протяженностью, достигающей десятков тысяч километров, что затрудняет их реализацию. Одним из факторов, влияющих на величину отношения сигнала к шуму на приемнике, является длина волны передатчика. В настоящее время используются спектральные диапазоны, успешно применяемые для наземной волоконно-оптической связи, но не являющиеся оптимальными для космических систем. **Целью работы** является выявление критериев и выбор наилучшей рабочей длины волны для оптической связи между космическими аппаратами. **Используемые методы:** для реализации поставленной цели применено математическое моделирование космической системы связи, позволившее провести расчеты зависимостей мощностей принимаемых сигналов от параметров передающей и приемной антенн, максимального расстояния между космическими аппаратами и длины волны оптического излучения. **Результаты:** проведены оценки сигналов и шумов, а также максимальных расстояний между космическими аппаратами для разных рабочих длин волн при сохранении требуемого качества связи. **Практическая значимость:** показано, что уменьшение рабочей длины волны до 1 мкм позволяет увеличить дальность оптической связи до 50–100 тыс. км при сохранении разумной мощности передатчика и габаритов антенн.

Ключевые слова: искусственный спутник Земли, космический аппарат, оптическая система связи в открытом пространстве, оптическое отношение сигнала к шуму, качество связи, Q-фактор

Общие сведения об оптической связи между космическими аппаратами

Оптическая связь между космическими аппаратами (КА) относится к более широкому классу систем оптической связи в открытом пространстве (FSO, аббр. от англ. Free-Space Optical Communication). Системы FSO могут использоваться для передачи цифровых и аналоговых сигналов [1]. Они обладают значительными преимуществами перед системами радиосвязи в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн. Их внедрение значительно увеличивает пропускную способность, помехоустойчивость и скрытность связи, одновременно снижая массу и энергопотребление бортовой аппаратуры КА, которые разрабатываются не только для гражданских, но и для военных целей. Для повышения надежности связи работа систем FSO обычно дублируется радиосвязью [2, 3].

Современные системы FSO для космической связи имеют топологию «точка – точка» и обеспечивают оптическую связь в пределах прямой видимости, как между искусственными спутниками Земли (ИСЗ) и наземными станциями, так и между ИСЗ, находящимися на орбитах одного или разных уровней.

Библиографическая ссылка на статью:

Былина М. С., Глаголев С. Ф., Гордийчук И. М., Мельников С. В. Выбор длины волны для оптической связи между космическими аппаратами // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 3. С. 1. EDN: VQLCIC

Reference for citation:

Bylina M., Glagolev S., Gordiychuk I., Melnikov S. Selection of Wavelength for Optical Communication between Spacecraft // Bulletin of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 3. P. 1. EDN: VQLCIC

Существуют низкоорбитальные, среднеорбитальные и высокоорбитальные ИСЗ, а также геостационарные. Системы FSO могут также использоваться для связи с КА, выполняющими различные миссии в далеком космосе, например, полеты к другим планетам или к Луне.

Для увеличения дальности связи и скорости передачи информации в FSO применяют мощные оптические передатчики (единицы и десятки Ватт), оптические антенны диаметром 10–35 см, которые обеспечивают узкую диаграмму направленности (2–4 угловые секунды).

Длины волны излучения для существующих FSO

Для формирования в FSO оптических сигналов (обычно цифровых) применяется модулированное и кодированное узконаправленное лазерное излучение на длинах волн от $\lambda = 0,8 - 1,6$ мкм в ближнем инфракрасном диапазоне [1]. Также возможно использование видимого диапазона оптического излучения $\lambda = 0,5 - 0,7$ мкм. Оптические сигналы между КА и ИСЗ могут в большей или меньшей степени попадать в атмосферу Земли, а при связи с наземными станциями сигналы проходят через всю земную атмосферу [1].

При выборе длины волны лазерного излучения для FSO необходимо учитывать потери и искажения сигнала в среде распространения (атмосфера или космический вакуум) и расстояние между передатчиком и приемником. Рассмотрим длины волн, использовавшихся в FSO предыдущих поколений [1].

Диапазон 800–900 нм широко использовался в ранних системах FSO и продолжает использоваться в сравнительно коротких оптических линиях связи (до 10 км), например, между городскими зданиями. Излучение полупроводниковых лазеров на основе арсенида галлия на этой длине волны имеет малое затухание при прохождении через атмосферу в ясную погоду, но подвержено сильным влияниям дождя и тумана.

Диапазон 1020–1080 нм используется для связи на большие расстояния между спутниками и наземными станциями. В качестве излучателей применяют волоконные лазеры на основе редкоземельных элементов: неодима (Nd) и иттербия (Yb). Излучение хорошо проходит через атмосферу, но также испытывает влияние дождя и тумана.

Диапазон 1520–1560 нм – наиболее распространенный для современных систем FSO. Излучение удовлетворительно проходит через атмосферу, представляет меньшую опасность для глаз. Системы FSO на этой длине волны хорошо совместимы с современными наземными волоконно-оптическими системами связи (ВОСС) с технологией плотного спектрального мультиплексирования (DWDM, аббр. от англ. Dense Wavelength Division Multiplexing), что упрощает разработку и уменьшает стоимость таких систем.

Энергетический бюджет FSO с топологией «точка – точка»

Вопросам выбора длины волны для системы FSO, предназначенной для связи между КА, частично посвящена статья [4]. На рисунке 1 показана упрощенная оптическая схема многоканальной FSO с технологией DWDM, которая включает передатчик (ПРД) с выходной мощностью P_0 , линзовую передающую антенну (Л1), формирующую узконаправленный почти параллельный пучок радиусом W_0 с угловой расходимостью θ и распространяющийся на расстояние L . Схема многоканального ПРД включает M маломощных канальных ПРД, чьи модулированные излучения объединяются в мультиплексе и усиливаются в оптическом усилителе (ОУ) мощности. Приемная линзовая антенна Л2 радиусом W_R фокусирует проходящее излучение на приемнике (ПМР).

Энергетическим расчетам для FSO посвящены работы [1, 3–8]. Используя [8], полагаем, что выходящий из Л1 пучок является гауссовским и имеет максимальную интенсивность на своей оси:

$$I_0 = 2P_0/\pi \cdot W_0^2. \quad (1)$$

Далее этот пучок распространяется вдоль оси z , расширяясь в пространстве за счет дифракции, но сохраняя гауссовскую форму. Угол его расходимости θ (рад) зависит от длины волны излучения λ_0 и радиуса пучка W_0 на выходе Л1 [7]:

$$\theta = \lambda_0/\pi \cdot W_0. \quad (2)$$

С увеличением расстояния z радиус гауссовского пучка увеличивается:

$$W(z) = W_0 \cdot \sqrt{1 + (z/z_0)^2} = W_0 \cdot \sqrt{1 + (z \cdot \lambda_0 / \pi \cdot W_0^2)^2}, \quad (3)$$

где $z_0 = \pi \cdot W_0^2 / \lambda_0$ – расстояние, на котором радиус пучка возрастает в $\sqrt{2}$ раз. Это расстояние называют также глубиной резкости.

Запишем выражение для зависимости интенсивности I (Вт/м²) от расстояния ρ до оси пучка на расстоянии z от передатчика:

$$I(\rho, z) = 2 \cdot P_0 / [\pi \cdot W^2(z)] \cdot \exp(-2 \cdot \rho^2 / W^2(z)). \quad (4)$$

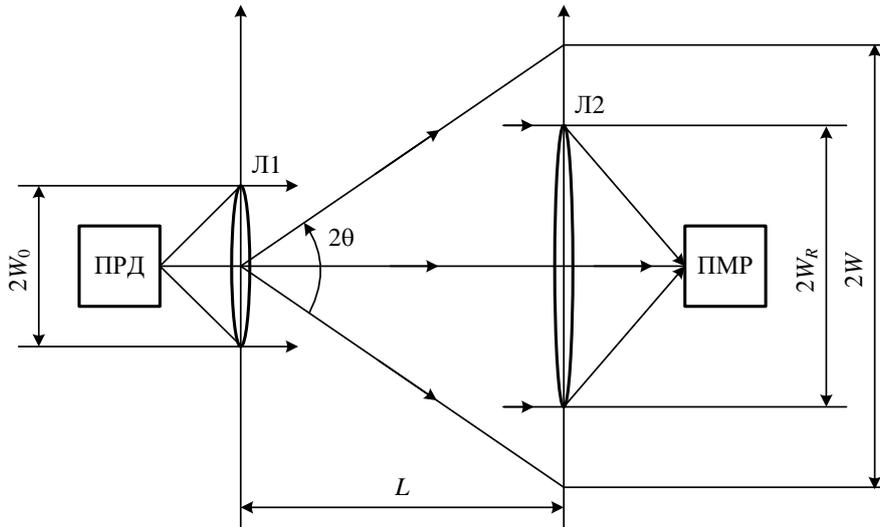


Рис. 1. Упрощенная оптическая схема канала FSO в безвоздушном пространстве

Определим зависимость оптической мощности P_R и ее уровня p_R на входе ПМР от расстояния z до ПРД при точном наведении друг на друга антенн передатчика и приемника:

$$P_R(z) = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^{W_R} I(\rho, z) \cdot \rho \cdot d\rho, \quad (5)$$

$$p_R(z) = 10 \cdot \lg[P_R(z) / (1 \text{ мВт})].$$

На рисунке 2 показаны результаты расчетов распределения интенсивности $I(\rho)$ (мВт/м²) в гауссовском пучке на расстоянии $L = 50\,000$ км.

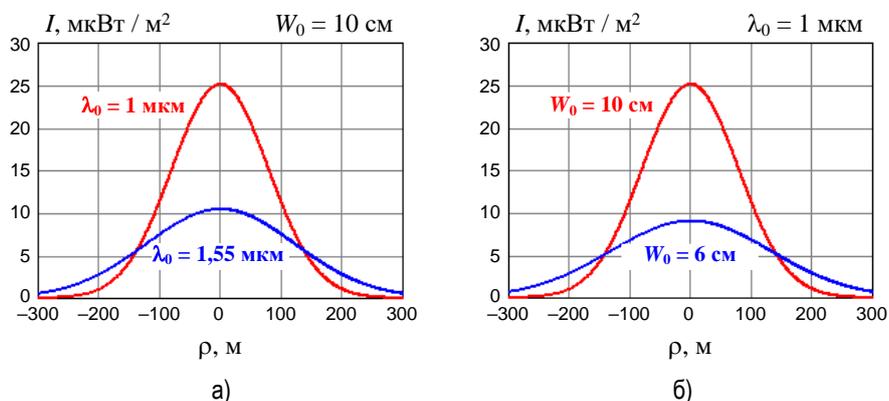


Рис. 2. Распределение интенсивности в гауссовском пучке на входе приемника:
а) при длинах волн 1 и 1,55 мкм и радиусе $W_0 = 10$ см; б) при радиусах $W_0 = 10$ см и $W_0 = 6$ см

Расчеты $I(\rho)$ проводились в программе MathCad по выражениям (1–4) для мощности $P_0 = 1$ Вт и двух радиусов $W_0 = 6$ и 10 см. На рисунке 3а показаны зависимости радиуса светового пучка $W(z)$ в плоскости приемной антенны, рассчитанные по (3). На рисунке 3б показаны зависимости уровня мощности на выходе приемной антенны $p_R(z)$ для $W_0 = W_R = 10$ см, рассчитанные по (5). Отметим, что при любых расстояниях z уровень p_R для $\lambda_0 = 1$ мкм превышает p_R для $\lambda_0 = 1,55$ мкм на 3,8 дБ.

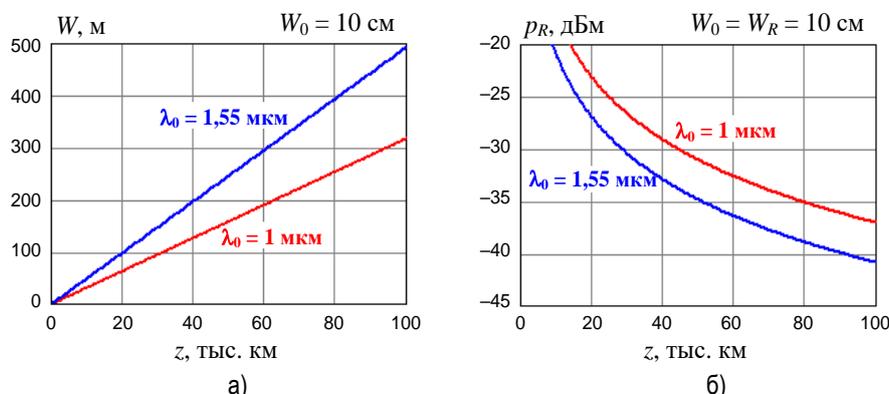


Рис. 3. Зависимость от расстояния и длины волны: а) радиуса пучка на приемной антенне; б) уровня сигнала на выходе приемной антенны

Из рисунков 2 и 3а видно, что радиус выходного пучка W на больших расстояниях z намного превышает радиус пучка излучения, выходящего из передатчика W_0 .

На рисунке 4 показаны результаты расчетов зависимости затухания α от расстояния между ПРД и ПМР для разных длин волн λ_0 и диаметров антенн W_0 :

$$\alpha(z) = p_0 - p_R(z) = 10 \cdot \lg[P_0/(1 \text{ мВт})] - p_R(z). \quad (6)$$

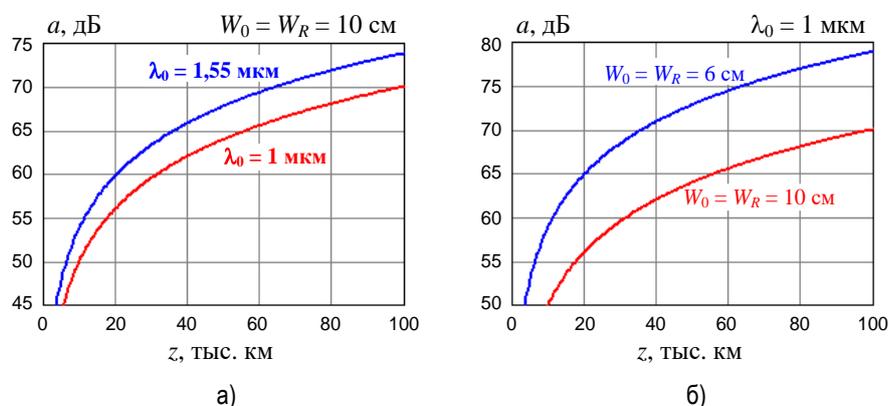


Рис. 4. Зависимости затухания от расстояния между ПРД и ПМР: а) при разных длинах волн; б) при разных диаметрах передающих и приемных антенн

Сигналы и шумы на выходе многоканальной FSO

Будем полагать, что схема ПМР включает предварительный ОУ с коэффициентом усиления $g_{ноу}$, демультиплексор с вносимыми потерями a_{dmux} , M канальных фотоприемных устройств (ФПУ), в которых может использоваться энергетический или когерентный прием. Запишем выражение для уровня мощности канального сигнала на входе ФПУ:

$$p_{сф}(z) = p_R(z) - 10 \cdot \lg(M) - a_{dmux} + g_{ноу}, \quad (7)$$

где член $10 \cdot \lg(M)$ со знаком «минус» учитывает, что мощность одного канала в M раз меньше мощности многоканального сигнала.

В [9] и техническом описании оборудования «ВОЛГА» для магистральных сетей (https://t8.ru/upload/vote/ee6/kwoa5yedet9czyyuddj1ldrzoa8nudvu/T8-I-Volga-Telekom_10.09.pdf) приведены подробные сведения о параметрах ВОСС с технологией DWDM, работающих в диапазоне C (1,53–1,57 мкм). Для сравнения качества связи в FSO на длинах волн 1,55 и 1,0 мкм будем полагать одинаковыми в первом приближении основные параметры ФПУ. Примем для модуляции DP-QPSK пороговый уровень канальных мощностей $p_{s\phi min} = p_{pr} = -25$ дБм и требуемое значение оптического отношения сигнала к шуму $OSNR_T = 11,4$ дБ. Тогда можно определить зависимость минимального коэффициента усиления предварительного ОУ $g_{noy}(z)$ в дБ от расстояния z :

$$g_{noy}(z) = +p_{pr} - p_R(z) + 10 \cdot \lg(M) + a_{dmux}. \quad (8)$$

Результаты расчетов $g_{noy}(z)$ и всех последующих расчетов приводятся для двух длин волн $\lambda_0 = 1$ и 1,55 мкм, при $P_0 = 1$ Вт и $W_0 = W_R = 10$ см. На рисунке 5 представлены результаты расчетов $g_{noy}(z)$ для $M = 1$ и 4. Отметим, что в расчетах использовались значения $a_{dmux} = 0$ при $M = 1$ и $a_{dmux} = 5$ дБ при $M = 4$. Видно, что при сравнительно малых расстояниях можно отказаться от предварительного ОУ. Отметим, что при увеличении числа каналов и сохранении общей мощности передатчика 1 Вт возрастают требования к коэффициенту усиления.

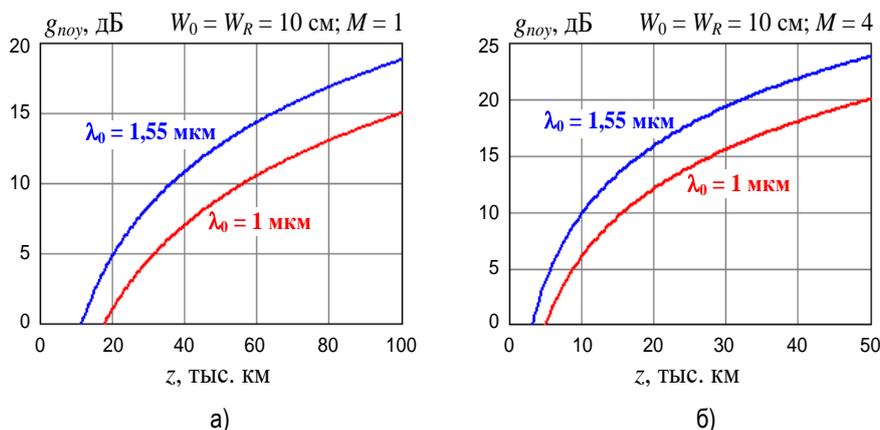


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления предварительного ОУ от расстояния и длины волны для $M = 1$ (а) и 4 (б)

Полагая усиленное спонтанное излучение (УСИ) основным источником оптических шумов на выходе предварительного ОУ, определим его уровень [9]:

$$p_{SP} = 10 \cdot \lg(h \cdot \nu \cdot \Delta\nu_0 \cdot F_n \cdot (G_{noy} - 1) / 1 \text{ мВт}), \quad (9)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,14 \cdot 10^{-15}$ эВ·с – постоянная Планка; ν – несущая частота i -го канального сигнала; $\Delta\nu_0 = 12,5$ ГГц – ширина полосы, в которой принято определять мощность УСИ; F_n – шум-фактор предварительного ОУ; G_{noy} – безразмерный коэффициент усиления предварительного ОУ.

На рисунке 6 показаны зависимости уровня УСИ от расстояния, рассчитанные по (9) с учетом (8) для $M = 1$ и 4. Анализ результатов на рисунках 5 и 6 показывает, что для более короткой длины волны требуемые значения коэффициентов усиления предварительного ОУ g оказываются на 4 дБ ниже. При этом уровни УСИ также уменьшаются, но всего на 2,5 дБ. Это объясняется тем, что мощность УСИ пропорциональна средней частоте ν , которая возрастает с уменьшением длины λ . Это обстоятельство несколько снижает общую эффективность перехода на более короткие волны.

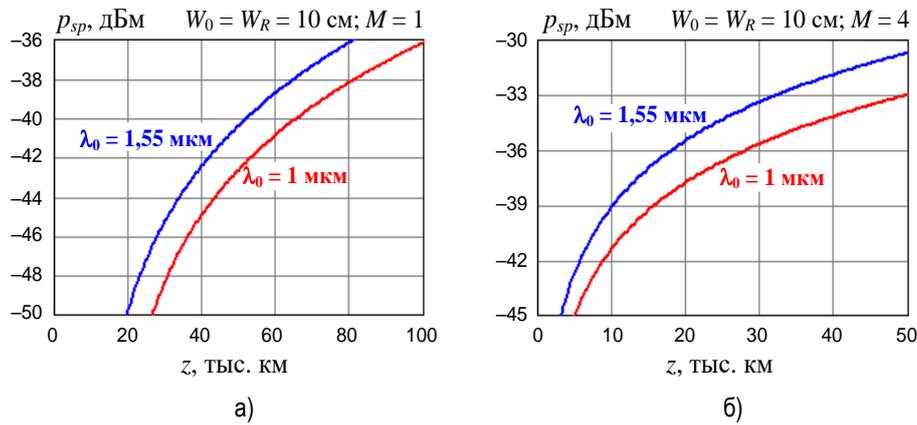


Рис. 6. Зависимость уровня УСИ от расстояния и длины волны для $M = 1$ (а) и 4 (б)

Далее определим зависимости оптического отношения сигнала к шуму (OSNR) для M -канальной FSO от расстояния по выражению:

$$OSNR(z) = p_R(z) - 10 \cdot \lg(M) - p_{sp}(z). \quad (10)$$

На рисунке 7 показаны зависимости OSNR от расстояния z между передающей и приемной антеннами для $M = 1$ и 4 при сохранении мощности передатчика на уровне 1 Вт. На графиках указано требуемое значение $OSNR_T = 11,4$ дБ для ВОСС со скоростью передачи $B_c = 100$ Гбит/с [9], которое позволяет графически определять максимальное расстояние L_{max} между ПРД и ПМР. В таблице 1 приведены значения максимальных расстояний L_{max} и затуханий a_{max} для различных значений мощностей передатчиков P_0 , количества каналов M и диаметров антенн $W_0 = W_R$.

Выводы по результатам расчетов

Из рисунка 7 и таблицы 1 видно, что переход от одного канала $M = 1$ к $M = 4$ сопровождается большим сокращением максимального расстояния между ПРД и ПМР. Это обусловлено уменьшением в 4 раза канальной мощности и необходимостью использования демультиплексора в многоканальной FSO с вносимыми потерями $a_{dmux} = 5$ дБ.

Для увеличения максимального расстояния между ПРД и ПМР необходимо увеличивать диаметры (апертуры) антенн и мощность передатчика и уменьшать длину волны излучения и количество каналов.

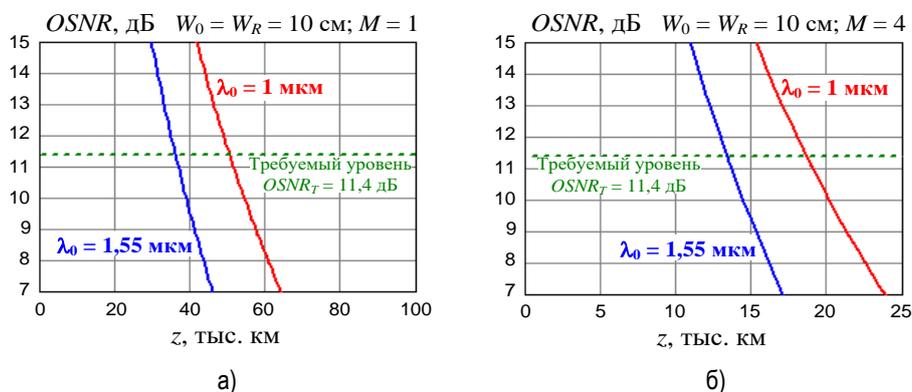


Рис. 7. Зависимость OSNR от расстояния между КА и длины волны для $M = 1$ (а) и 4 (б)

Таблица 1. Максимальные расстояния между ПРД и ПМР

Исходные данные				Результаты расчетов	
M	P_0 , Вт	$W_0 = W_R$, см	λ_0 , мкм	a_{\max} , дБ	L , тыс. км
1	0,25	10	1,0	55,0	25,0
1	0,25	10	1,55	56,0	18,0
1	1,0	10	1,0	61,0	50,0
1	1,0	10	1,55	62,0	36,0
1	1,0	6	1,0	61,0	18,0
1	4,0	10	1,0	67,0	100,0
1	4,0	10	1,55	68,0	72,0
4	0,25	10	1,0	46,4	9,3
4	0,25	10	1,55	47,4	6,7
4	1,0	10	1,0	52,4	18,5
4	1,0	10	1,55	53,4	13,5
4	4,0	10	1,0	58,4	37,0
4	4,0	10	1,55	59,3	26,5

Заключение

В работе доказаны возможности увеличения дальности оптической связи в одноканальных системах FSO до 50–100 тыс. км при разумных мощностях излучения от 1 до 4 Вт на длине волны 1 мкм и диаметрах линзовых антенн (телескопов) до 10 см.

Представлены возможности увеличения дальности связи и оптимизации параметров FSO с учетом конкретных требований, таких как дальность, размеры системы, скорость передачи данных, количество каналов и ограничения по излучаемой мощности.

Продолжаются работы по имитационному моделированию FSO с конкретными параметрами.

Литература

1. Hemmati H. Near-Earth Laser Communications // Near-Earth Laser Communications. CRC Press, 2020. 466 p. DOI: 10.1201/9780429186721
2. Toyoshima M. Trends in Satellite Communications and the Role of Optical Free-Space Communications [Invited] // Journal of Optical Networking. 2005. Vol. 4. Iss. 6. PP. 300–311. DOI: 10.1364/JON.4.000300
3. Aladeloba A. O. Optically Amplified Free-Space Optical Communication Systems: Thesis Submitted to the University of Nottingham for the Degree of Doctor of Philosophy. 2013. 193 p. URL: <https://eprints.nottingham.ac.uk/13304/1/AladelobaAbisayoThesis.pdf>
4. Глаголев С. Ф., Гордийчук И. М. Оптические усилители на иттербиевом волокне для систем космической связи // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 2. EDN: MSPXWZ
5. Kumari G., Selwal C. System Analysis for Optical Inter-Satellite Link with Varied Parameter and Pre-Amplification // International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI, 21–24 September 2016, Jaipur, India). 2016. PP. 2157–2161. DOI: 10.1109/ICACCI.2016.7732371
6. Ganga S. S., Asha R. S., Shaija P. J. Design of a Standardized inter Satellite Optical Wireless Communication (IsOWC) System with Minimum Input Power // Procedia Technology. 2016. Vol. 25. PP. 567–573. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.146
7. Кадочников Д. М., Кададова А. В., Сотникова Н. В., Трилис А. В., Уткин В. В. Построение систем оптической связи для малых космических аппаратов // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. Т. 1. № 4. С. 134–144. EDN: KJOSJB
8. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения: учебное пособие / пер. с англ. Т. 1. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. 760 с.
9. Трещиков В. Н., Листвин В. Н. DWDM системы. М.: Техносфера, 2021. 420 с.

Статья поступила 17 июля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 05 августа 2025 г.
Принята к публикации 04 сентября 2025 г.

Информация об авторах

Былина Мария Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Email: Bylina.Maria@sut.ru

Глаголев Сергей Федорович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Email: Glagolev.Sergey@sut.ru

Гордийчук Ирина Михайловна – аспирант кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Мельников Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, директор по специальным проектам ОАО «Супертел»

Selection of Wavelength for Optical Communication between Spacecraft

M. Bylina¹✉, S. Glagolev¹, I. Gordiychuk¹, S. Melnikov²

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²SUPERTEL,
St. Petersburg, 197046, Russian Federation

Problem Statement. Optical transmission systems between spacecraft are characterized by a length reaching tens of thousands of kilometers, which complicates their implementation. One of the factors affecting the signal-to-noise ratio at the receiver is the transmitter wavelength. Currently, spectral ranges are used that are successfully applied for terrestrial fiber-optic communication, but are not the best for space systems. **Purpose** of the paper is to identify criteria and select the best operating wavelength for optical communication between spacecraft. **Methods.** To achieve the stated goal, mathematical modeling of the space communication system was used, which made it possible to calculate the dependences of the received signal powers on the parameters of the transmitting and receiving antennas, the maximum distance between spacecraft and the wavelength of optical radiation. **Results.** The signals and noise, as well as the maximum distances between spacecraft for different operating wavelengths while maintaining the required communication quality, were estimated. **Practical relevance.** It has been shown that reducing the operating wavelength to 1 μm allows increasing the optical communication range to 50–100 thousand kilometers while maintaining reasonable transmitter power and antenna dimensions.

Key words: artificial earth satellite, spacecraft, free-space optical communication system, optical signal-to-noise ratio, communication quality, Q-factor

Information about Authors

Bylina Maria – Ph. D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: Bylina.Maria@sut.ru

Gragolev Sergey – Ph. D. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Gordiychuk Irina – Ph. D. Student of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Melnikov Sergey – Ph. D. of Technical Sciences, Associate Professor, Director of Special Projects (SUPERTEL)