

УДК 621.391
EDN: JSNXCW

Моделирование оптической системы связи в открытом пространстве с использованием усилителей на иттербиевом волокне

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. Для оптических систем связи между космическими аппаратами, которые могут иметь протяженность десятки тысяч километров, выгодно использовать более короткие длины волн, чем для волоконно-оптических систем связи (обычно 1550 нм). Особый интерес представляет исследование возможностей применения диапазона вблизи длины волны 1040 нм, в котором работают оптические усилители на основе волокна, легированного ионами иттербия. **Целью работы** является моделирование и исследование оптической системы связи между космическими аппаратами со скоростью передачи 100 Гбит/с и модуляцией QPSK, работающей на длине волны 1040 нм. **Используемые методы:** для решения поставленной задачи применено математическое моделирование системы связи в среде Optisystem. **В результате** проведенного исследования определены параметры усилителя мощности и предварительного усилителя, а также максимальная протяженность рассматриваемой системы связи. **Практическая значимость:** показана возможность создания оптической системы связи между космическими аппаратами, удаленными друг от друга на расстояние более 50 000 км, на длине волны 1040 нм при диаметрах приемной и передающей антенн 10 см.

Ключевые слова: оптические системы связи в открытом пространстве, легированное ионами иттербия оптическое волокно, оптический усилитель, когерентный прием цифровых оптических сигналов, космический аппарат

Введение

Необходимыми элементами систем связи в открытом пространстве (FSO, аббр. от англ. Free-Space Optical Communication) являются оптические усилители (ОУ) мощности для передатчиков и предварительные ОУ для приемников цифровых оптических сигналов [1, 2]. Для усиления оптических сигналов успешно используются волоконные ОУ на основе одномодовых оптических волокон, легированных ионами различных редкоземельных металлов: эрбия, иттербия, неодима, празеодима, тулия и гольмия [3]. В работах [1, 4–7] рассмотрены возможности использования ОУ на основе оптических волокон, легированных иттербием (YDFA, аббр. от англ. Ytterbium-Doped Fiber Amplifier). Эти ОУ характеризуются широкой полосой усиливаемых длин волн ($\lambda_0 = 1020\text{--}1060$ нм), высокими выходной мощностью p_l (до единиц и десятков Вт), энергетической эффективностью преобразования накачки в сигнал и теплостойкостью используемых в них волокон, легированных иттербием (YDF).

Библиографическая ссылка на статью:

Былина М. С., Глаголев С. Ф., Гордийчук И. М., Мельников С. В. Моделирование оптической системы связи в открытом пространстве с использованием усилителей на иттербиевом волокне // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 4. С. 1. EDN: JSNXCW

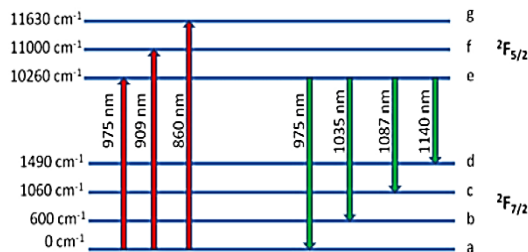
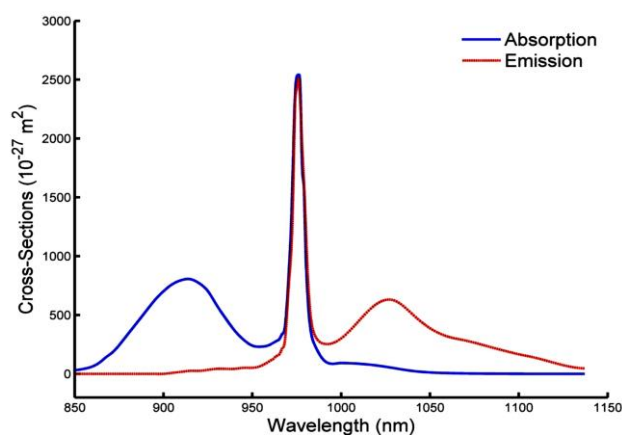
Reference for citation:

Bylina M., Glagolev S., Gordiychuk I., Melnikov S. Simulation of a Free-Space Optical Communication System Using Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 4. P. 1. EDN: JSNXCW

Принцип действия YDFA

Принцип действия YDFA основан на оптических свойствах волокон YDF, сердцевина которых легирована ионами иттербия Yb^{3+} . Подобные процессы усиления происходят в ОУ на основе волокон, легированных ионами других редкоземельных элементов, например эрбия. Преимуществом YDFA перед другими волоконными ОУ является широкий диапазон длин волн накачки ($\lambda_p = 0,86\text{--}1,064$ мкм) [7].

На рисунке 1 показана структура энергетических уровней, а на рисунке 2 — спектр сечений поглощения (синий) и излучения (красный) Yb^{3+} в широко распространенном германо-силикатном стекле. В структуре уровней Yb^{3+} (рисунок 1) рассматриваются две полосы: нижняя $^2F_{7/2}$ и возбужденная $^2F_{5/2}$. Фотоны накачки переводят ионы Yb^{3+} с подуровня а полосы $^2F_{7/2}$ на более высокие энергетические уровни в полосе $^2F_{5/2}$, с которых они перемещаются за счет безызлучательных переходов на подуровень е внутри полосы $^2F_{5/2}$. На этом квазистационарном подуровне за счет интенсивной накачки и сравнительно большого времени жизни (0,8 мс) формируется высокая инверсная населенность ионов Yb^{3+} . Отметим, что ионы иттербия по времени жизни на квазистационарном уровне значительно уступают ионам эрбия, у которых оно составляет 12 мс.

Рис. 1. Структура энергетических уровней ионов Yb^{3+} Рис. 2. Сечения поглощения (синий график) и излучения (красный график) ионов Yb^{3+}

Фотоны сигнала вызывают стимулированное излучение при переходе ионов иттербия с подуровня е полосы $^2F_{5/2}$ на уровни b и c полосы $^2F_{7/2}$. В результате возникает когерентное усиление сигнала, которое сопровождается мощным усиленным спонтанным излучением (ASE, аббр. от англ. Amplified Spontaneous Emission) на резонансной для Yb^{3+} длине волн $\lambda_{ASE} = 975$ нм, на которой сечения поглощения и излучения одновременно достигают резкого максимума (рисунок 2).

Рисунок 2 подтверждает [7], что для накачки можно использовать длины волн от 860 до 1000 нм, включая и $\lambda_p = 975$ нм; из него также видно, что YDFA может усиливать сигналы в диапазоне длин волн от 1020 до 1080 нм.

Объектом данного исследования является схема FSO со средней длиной волны сигнала $\lambda_0 = 1040$ нм, содержащая два YDFA – ОУ мощности и предварительный ОУ. Цель исследования состоит в определении приемлемых (близких к оптимальным) параметров ОУ мощности и предварительного ОУ, включая длины волн сигнала λ_0 и накачки λ_p , уровни мощности накачки P_p , длины YDF l . Основным критерием приемлемости технических решений, касающихся рассматриваемых усилителей, является максимизация затухания $\alpha_{\max}$ в линейном оптическом тракте. Это затухание определяет дальность связи $L_{\max}$, ограниченную расходимостью θ и уровнем мощности p_0 оптического пучка передатчика, при безусловном сохранении удовлетворительного качества связи. Полагаем, что при использовании кодов с опережающей коррекцией ошибок (FEC, аббр. от англ. Forward Error Correction) Q-фактор должен быть больше 3.

Схема для имитационного моделирования одноканальной FSO

Схема для имитационного моделирования одноканальной FSO (рисунок 3) создана в программе OptiSystem. В схеме используется когерентный прием оптического сигнала с модуляцией QPSK (аббр. от англ. Quadrature Phase Shift Keying) и скоростью передачи 100 Гбит/с.

Схема передающей части FSO включает: 1) передатчик с длиной волны $\lambda_0 = 1040$ нм и уровнем мощности лазерного диода 13 дБм и 2) YDFA мощности (бустер) с двунаправленной накачкой. Целью исследования передающей части было достижение уровня максимальной выходной мощности p_{lmax} при ограничении уровней мощности: для источников накачки величиной $p_{pmax} = 37$ дБм (5 Вт), а для ASE $p_{ASE} = 16$ дБм (40 мВт). Для достижения этой цели в процессе исследований изменялись: длина YDF l , длины волн сигнала λ и накачки λ_p , уровни мощности попутной p_{p1} и встречной p_{p2} накачек.

Для имитации потерь в линейном тракте FSO используется оптический аттенюатор.

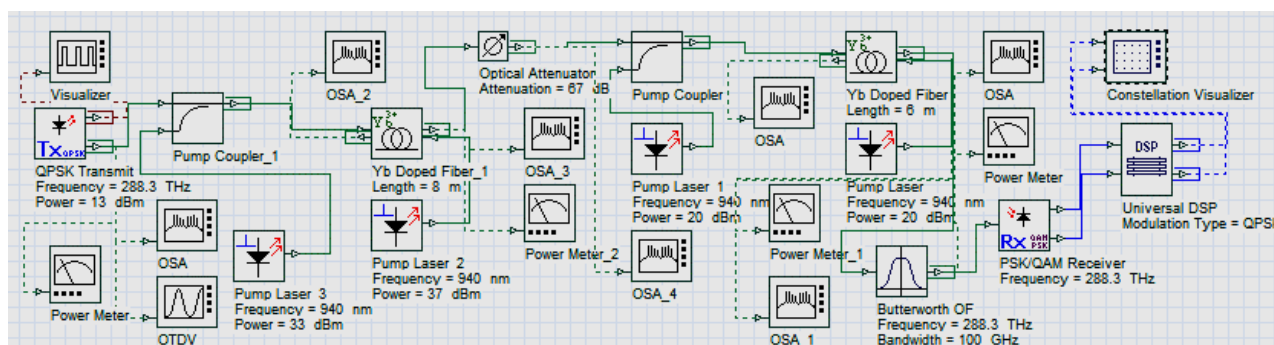


Рис. 3. Схема моделирования FSO

Схема приемной части FSO включает предварительный YDFA с двунаправленной накачкой на длине волны λ_p , оптический полосовой фильтр (OF), когерентное фотоприемное устройство (Rx) и цифровой сигнальный процессор (DSP). Целью исследования приемной части FSO было достижение максимальных значений Q -фактора при максимальном затухании сигнала в линейном тракте.

Для контроля процессов в схеме моделирования используются оптические приборы: измерители средней мощности (Power Meter), осциллографы (OTDV), анализаторы спектра (OSA), а также электрический прибор для наблюдения сигнальных созвездий (Constellation Visualizer).

Результаты исследований передающей части FSO

Первоначально были установлены параметры накачки ОУ мощности: длина волны $\lambda_p = 940$ нм, а также уровни попутной и встречной накачек $p_{p1} = 33$ и $p_{p2} = 37$ дБм, соответственно. Длину YDF l в ОУ мощности изменяли от 7 до 60 м. Было установлено, что при этом уровень средней мощности выходного сигнала ОУ мощности p_{sm} , равный 30,6 дБм, изменялся не более, чем на 0,1 дБ. Также мало менялся уровень мощности ASE на входе YDF p_{asem_for} — от 15,2 до 16 дБм (40 мВт), при этом уровень ASE на выходе p_{asem_out} был меньше 0,5 дБм. Поэтому для дальнейших расчетов была уменьшена мощность попутной накачки до 30 дБм (1 Вт), длина YDF установлена равной 10 м, проведены исследования зависимости параметров ОУ мощности от длины волны накачки λ_p , менявшейся в пределах от 920 до 985 нм.

Из таблицы 1 видно, что на всех λ_p можно получить достаточно высокий уровень выходного сигнала p_{sm} в пределах от 29,9 до 31,3 дБм. На длинах волн накачки 920–960 нм уровень p_{sm} находился в пределах от 29,9 до 30,5 дБм при p_{asem} не более 12,3 дБм.

На длине волны накачки 965 нм наблюдается спад выходного сигнала до 28,7 дБм, что согласуется с работами [1, 6]. При использовании длины волны 975 нм, резонансной для ионов иттербия, наблюдается значительное увеличение ASE, достигающее уровня 30,7 дБм. Однако увеличение длины YDF до 12 м обеспечивает максимальный уровень сигнала $p_{sm} = 31,3$ дБм при $p_{asem} < -9,1$ дБм.

Наибольший выходной сигнал $p_{sm} = 31,3$ дБм был получен на длинах волн 980 и 985 нм при умеренном $p_{asem} < 6,3$ дБм. Таким образом, приемлемым выбором можно считать $l = 10$ м и $\lambda_p = 980$ нм из-за меньшего уровня ASE. Коэффициент усиления g_{oym} для данного случая составил 32 дБ, а максимальный

уровень средней мощности выходного сигнала $p_{s0} = 37,4$ дБм (5,5 Вт) при суммарной мощности двух накачек 6 Вт. Рассеянная в YDF мощность составляет 0,5 Вт, т. е. удельная рассеиваемая мощность равна 50 мВт/м.

Вторым приемлемым вариантом можно считать $l = 12$ м и $\lambda_p = 975$ нм. При этом удельная рассеиваемая в YDF мощность будет меньше на 20 % по сравнению с первым вариантом.

Таблица 1. Результаты исследований передающей части FSO

№	Установленные величины				Измеренные величины			
	λ_p , нм	l , м	p_{p1} , дБм	p_{p2} , дБм	p_{sm} , дБм	p_{s0} , дБм	p_{asem_out} , дБм	p_{asem_for} , дБм
1	940	7	33	37	29,9	36,8	14	15,5
2	940	10	33	37	30,7	36,8	0,5	15,2
3	940	30	33	37	30,6	36,7	0,1	15,1
4	940	60	33	37	30,8	36,8	-4	16,0
5	920	10	30	37	29,9	36,5	11,5	12,0
6	940	10	30	37	30,4	36,6	8,0	12
7	950	10	30	37	30,5	36,7	4,2	11,8
8	960	10	30	37	30,1	36,7	11,5	12,3
9	965	10	30	37	28,7	35,6	12	13
10	970	10	30	37	30,3	36,5	6	12,4
11	972,5	10	30	37	31,15	37,2	-28,2	8,4
12	975	10	30	37	30,15	36,4	23,6	30,7
13	980	10	30	37	31,3	37,4	-4	-18
14	985	10	30	37	31,3	37,3	-0,83	6,3
15	975	11	30	37	31,3	37,3	7,9	15,0
16	975	12	30	37	31,3	37,4	-16,2	-9,1

На рисунке 4 показаны спектрограммы сигнала на выходе и входе ОУ мощности для $\lambda_p = 980$ нм, длина YDF 10 м, уровни мощности попутной и встречной накачек 30 и 37 дБм, соответственно. Суммарная мощность накачки в ОУ мощности составила 6 Вт, а полезная выходная мощность сигнала – 1,35 Вт в полосе 0,1 нм. Коэффициент преобразования мощности накачки в мощность сигнала составил 22 %.

Из рисунка 4 также видно, что максимальные уровни мощности ASE составляют -4 и -18 дБм, а уровни мощности остаточной накачки равны -24 и -30 дБм на входе и выходе YDF, соответственно, что намного ниже уровня выходного сигнала ОУ мощности, который составляет 31,3 дБм.

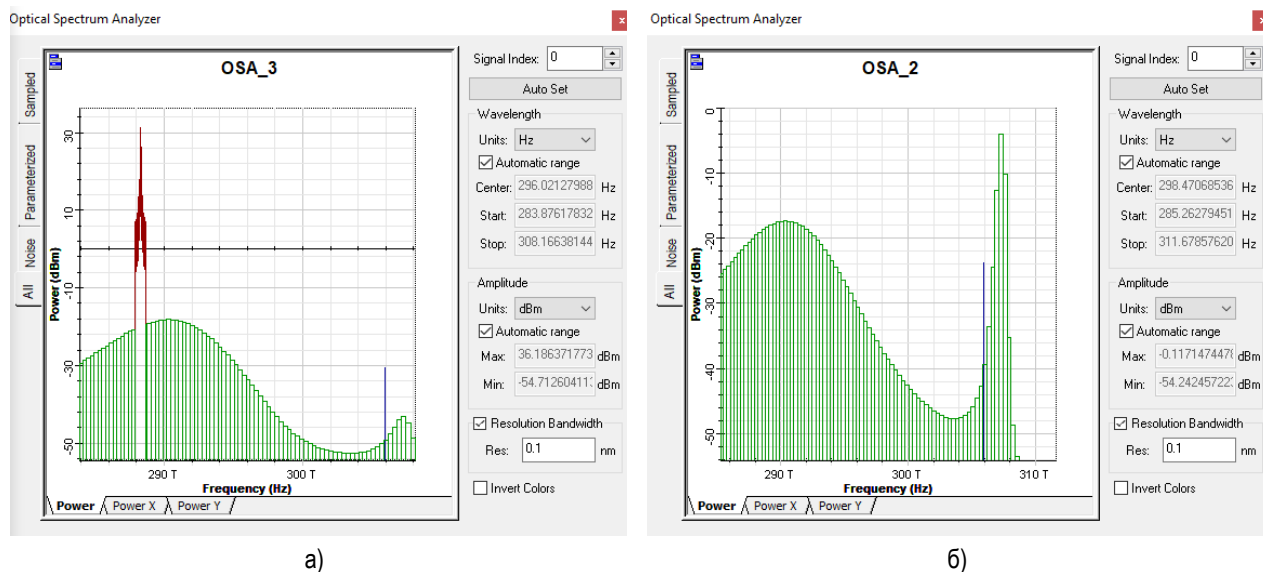


Рис. 4. Спектрограммы уровней оптического излучения на выходе YDF (а) и выходящего из YDF в сторону источника сигнала (б) в схеме ОУ мощности

Результаты исследований приемной части FSO

Результаты исследований приемной части FSO приведены в таблице 2. Проводились многочисленные исследования предварительных ОУ при различных длинах волн накачки λ_p от 940 до 980 нм, разных схемах накачки: попутной, встречной и двунаправленной, а также для различных длин YDF l . При этом параметры ОУ мощности соответствовали строке 13 таблицы 1 и рисунку 4, а затухание аттенюатора составляло 67 дБ.

Таблица 2. Результаты некоторых исследований приемной части FSO

№	Установленные величины						Измеренные величины				
	Тип накачки	λ_p , нм	l , м	p_{p1} , дБм	p_{p2} , дБм	$p_{p\Sigma}$, дБм	p_{sm} , дБм	$p_{asem,out}$, дБм	$p_{asem-for}$, дБм	p_{Φ} , дБм	Q
1	Попутн.	940	4	23	-90	23	-21.0	-35,1	3,8	-15,5	8,0
2	Встр.	940	4	-90	23	23	-21.0	3,8	-35,1	-15,3	6,8
3	Двунапр.	940	4	17	17	20	-19,3	-10,6	-10,6	-13,8	8,0
4	Двунапр.	940	3,5	17	17	20	-19,3	-10,6	-10,6	-13,7	8,0
5	Двунапр.	940	4,5	17	17	20	-19,8	-10,6	-10,6	-14,3	7,9
6	Двунапр.	960	4	17	17	20	-20,0	-8,7	-8,7	-14,5	8,0
7	Двунапр.	980	4	17	17	20	-20,3	9,3	9,3	-14,7	7,5
8	Двунапр.	980	6	17	17	20	-18,3	-10,4	-10,4	-12,7	7,7
9	Двунапр.	975	6	17	17	20	-18,7	-1,2	-1,2	-13,2	7,6
10	Двунапр.	975	6,5	17	17	20	-18,9	-14,6	-14,6	-13,4	7,5

Первоначально были установлены параметры накачки предварительного ОУ: длина волны $\lambda_p = 940$ нм, уровень попутной или встречной накачки $p_p = 23$ дБм (200 мВт); предварительно выбранная длина YDF $l = 4$ м. Более высокое значение Q -фактора (8) получилось для попутной накачки.

Практически такое же качество связи ($Q \approx 8$) было получено для двунаправленной накачки, но при значительно меньшей суммарной мощности 100 мВт (20 дБм) при длинах волн накачки 940 и 960 нм. Несколько худшее качество связи ($Q \approx 7,6$) было получено для длин волн накачки 980 и 975 нм.

На рисунке 5 показаны спектрограммы на входе и выходе YDF в предварительном ОУ с параметрами, приведенными в строке 3 таблицы 2. Коэффициент усиления предварительного ОУ составил $g_{Oyn} = 26,4$ дБ, оптическое отношение сигнала к шуму на выходе YDF – 16,7 дБ.

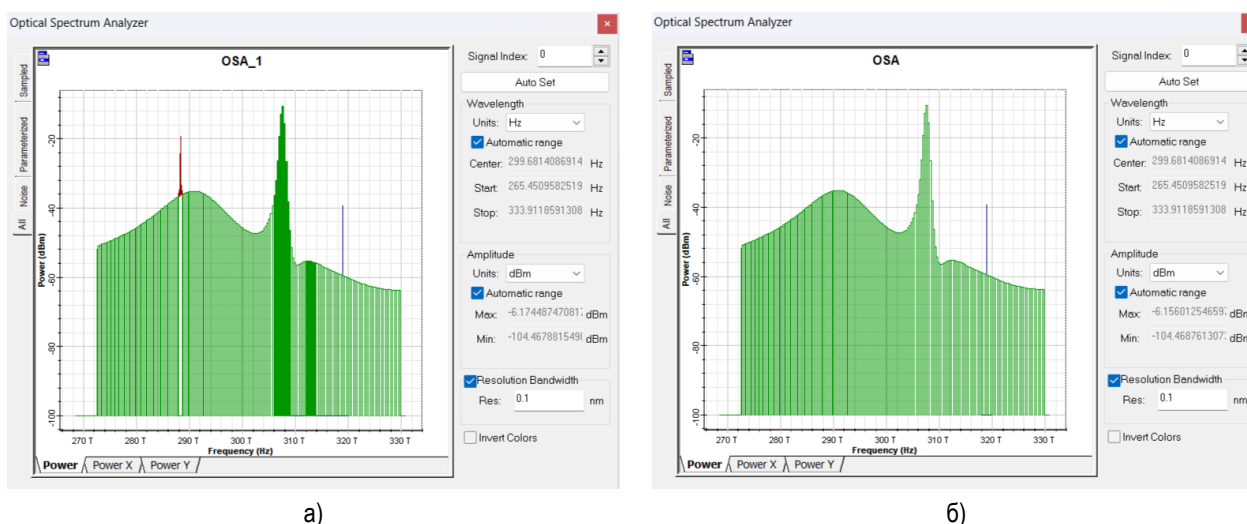


Рис. 5. Спектрограммы уровней оптического излучения на выходе YDF (а) и выходящего из YDF в сторону источника сигнала (б) в схеме предварительного ОУ

На рисунке 6 показана спектрограмма того же сигнала на выходе полосового фильтра и сигнальное созвездие на выходе цифрового сигнального процессора. Видно, что полосовой фильтр эффективно подавляет на входе фотоприемного устройства излучения ASE и остаточной накачки более чем на 50 дБ.

При увеличении затухания аттенюатора до 70 дБ Q-фактор уменьшается до 5,8, что вполне допустимо при использовании FEC.

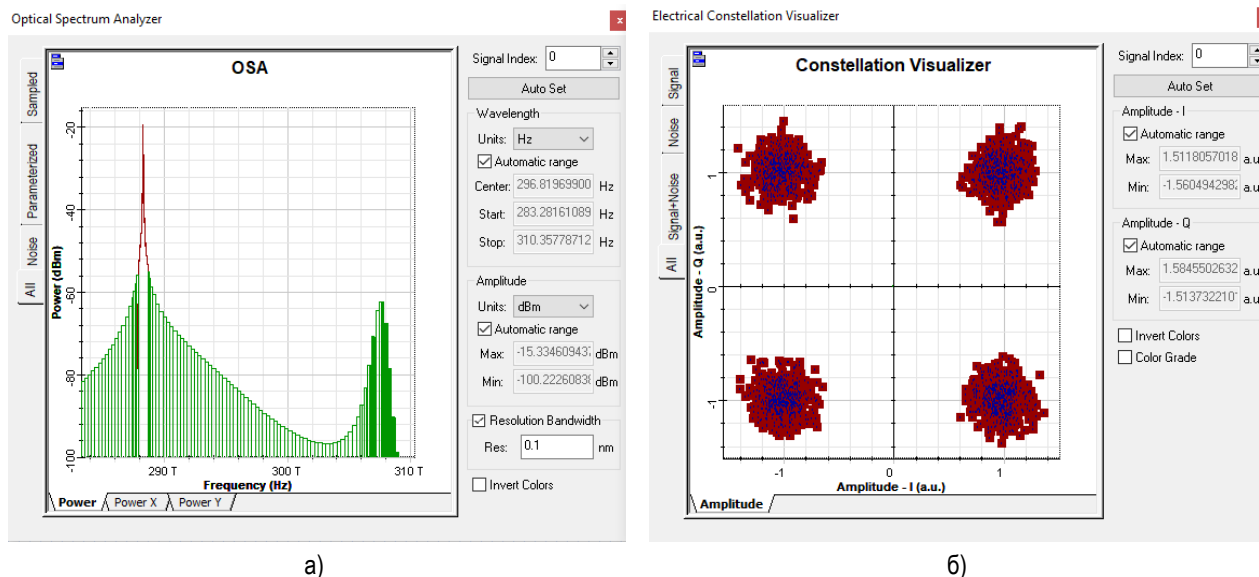


Рис. 6. Спектрограмма сигналов на входе фотоприемного устройства (а) и сигнальные созвездия на выходе цифрового сигнального процессора (б)

Выводы

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Во-первых, определены приемлемые для практического использования значения параметров YDFA мощности и предварительного YDFA в системе FSO для связи между космическими аппаратами при ограниченной до 6 Вт суммарной мощности всех накачек.

Во-вторых, показано, что в моделируемой системе FSO для связи между космическими аппаратами на длине волны $\lambda_s = 1040$ нм предельное затухание в линейном тракте может составлять 70 дБ, что соответствует максимальному расстоянию между космическими аппаратами более 50 тыс. км при радиусах приемной и передающей антенн $W = 10$ см.

В-третьих, предлагаемая схема, методика ее исследования и полученные результаты могут быть использованы разработчиками систем FSO, а также внедрены в учебный процесс для студентов, изучающих системы оптической связи.

Литература

1. 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
2. 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
3. Мендес А. Справочник по специализированным оптическим волокнам / Ред. Т. Ф. Морзе. М.: Техносфера, 2012. 727 с. EDN: QMXMSX
4. Albalawi A., Zhu H., Taccheo S., Chiasera A., Ferrari M., et al. Numerical Modeling of the Impact of Pump Wavelength on Yb-Doped Fiber Amplifier Performance // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48. Iss. 11. PP. 1–7. DOI: 10.1007/s11082-016-0771-z. EDN: DAPYDN
5. Zervas N. M. High Power Ytterbium-Doped Fiber Lasers – Fundamentals and Applications // International Journal of Modern Physics B. 2014. Vol. 28. Iss. 12. P. 1442009. DOI: 10.1142/S0217979214420090

6. Paschotta R., Nilsson J., Tropper A. C., Hanna D. C. Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1997. Vol. 33. Iss. 7. PP. 1049–1056. DOI: 10.1109/3.594865
7. Liu Y., Zhang Y., Xiao Y., Lu Y. The Gain Characters and Optimization of the Double-Pass Two-Stage Ytterbium-Doped Fiber Amplifier // Proceedings of the 2009 IEEE Symposium on Photonics and Optoelectronics (14–16 August 2009, Wuhan, China). DOI: 10.1109/SOPO.2009.5230311

Статья поступила 17 июля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 05 августа 2025 г.
Принята к публикации 14 ноября 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. Email: gordiichuk.im@sut.ru

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

Simulation of a Free-Space Optical Communication System Using Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers

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 communication systems between spacecraft, which can span tens of thousands of kilometers, benefit from using shorter wavelengths than terrestrial systems. Of particular interest is the study of the feasibility of using a wavelength near 1040 nm, for which an optical amplifier based on ytterbium-doped fiber exists. **Purpose** of the paper is to model and study an optical communication system between spacecraft with a transmission rate of 100 Gbit/s and QPSK modulation, operating at a wavelength of 1040 nm. **Methods.** To solve the problem, mathematical modeling of the communication system in the Optisystem environment was used. **Results.** A study was conducted and the parameters of the power amplifier and preamplifier, as well as the maximum length of the communication system under consideration, were determined. **Practical relevance.** The possibility of creating an optical communication system between spacecraft located more than 50 thousand kilometers apart, at a wavelength of 1040 nm with a receiving and transmitting antenna diameter of 10 cm, has been demonstrated.

Key words: free-space optical communication system, spacecraft, ytterbium-doped optical fiber, optical amplifier, coherent receiving of digital optical signals

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

Glagolev 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). Email: Glagolev.Sergey@sut.ru

Gordiychuk Irina – Ph. D. Student of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). Email: gordiichuk.im@sut.ru

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