

УДК 621.391
<https://doi.org/10.31854/3034-2201-2026-4-2-C01>
EDN: IZCJYY

Цифровая обработка сигналов в оптической системе 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. В оптических системах связи между космическими аппаратами, которые могут иметь протяженность в десятки тысяч километров, должен использоваться когерентный метод приема. Важнейшим компонентом когерентных систем является цифровой сигнальный процессор, выполняющий алгоритмы цифровой обработки принятых сигналов. В работе исследуется возможность использования в космических системах типового процессора, разработанного для волоконно-оптических систем связи. **Целью работы** является сравнение эффективности цифровой обработки сигналов одинаковыми цифровыми сигнальными процессорами в одноканальных когерентных космических и волоконно-оптических системах связи со скоростью передачи 100 Гбит/с и четырехуровневой фазовой модуляцией. **Используемые методы:** для решения поставленной задачи применено математическое моделирование систем связи в среде Optisystem. **Результаты:** проведено исследование эффективности цифровой обработки сигналов, испытавших затухание, а также частотные, фазовые и поляризационные искажения. **Практическая значимость:** показано, что программное обеспечение современных цифровых сигнальных процессоров не только позволяет эффективно обрабатывать сигналы в космических системах связи, но и может быть упрощено.

Ключевые слова: оптические системы связи в открытом пространстве, цифровой сигнальный процессор, когерентный прием цифровых оптических сигналов, космический аппарат

Введение

Данная статья является продолжением исследований авторов в области построения систем оптической связи в открытом пространстве (FSO, аббр. от англ. Free-Space Optical Communication) [1–3]. Для приема цифровых оптических сигналов могут использоваться методы энергетического и когерентного приема (КП), однако последний в сочетании с цифровой обработкой сигналов (ЦОС) имеет значительные преимущества. Это убедительно доказано для волоконно-оптических систем связи (ВОСС) с плотным мультиплексированием в волновой области (DWDM, аббр. от англ. Dense Wavelength Division Multiplexing) [4]. Очевидно, эти преимущества справедливы и для FSO между космическими аппаратами (КА) [5]. Целью данной работы является проверка возможности использования для FSO цифрового сигнального процессора (DSP, аббр. от англ. Digital Signal Processor), аналогичного тому, что применяется в ВОСС с КП, например, в [мультисервисной DWDM-платформе ВОЛГА](#) компании ООО «Т8».

Библиографическая ссылка на статью:

Былина М. С., Глаголев С. Ф., Гордийчук И. М., Мельников С. В. Цифровая обработка сигналов в оптической системе связи между космическими аппаратами // Вестник СПбГУТ. 2026. Т. 4. № 2. С. 1. DOI: 10.31854/3034-2201-2026-4-2-C01. EDN: IZCJYY

Reference for citation:

Bylina M., Glagolev S., Gordiychuk I., Melnikov S. Digital Signal Processing in an Optical Communication System between Spacecraft // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 4. Iss. 2. P. 1. DOI: 10.31854/3034-2201-2026-4-2-C01. EDN: IZCJYY

Исследования проводились с помощью имитационного моделирования в программе OptiSystem путем сравнения эффективности ЦОС для одноканальных систем FSO и ВОСС. Рассматриваемые системы связи имеют скорость передачи 100 Гбит/с, одинаковое затухание в линейном тракте, применяют фазовую модуляцию QPSK (аббр. от англ. Quadrature Phase Shift Keying) и КП; в них используется один и тот же тип DSP. Для FSO применялась длина волны 1040 нм, а линейный тракт моделировался оптическим attenuатором с затуханием 30 дБ. Для ВОСС использовалась длина волны 1550 нм и стандартное одномодовое оптическое волокно длиной 150 км в качестве линейного тракта. Коэффициент затухания был равен 0,2 дБ/км. При этом затухание в линейных трактах FSO и ВОСС одинаково и составляет 30 дБ. Качество связи оценивалось величиной Q-фактора.

Схемы моделирования (рисунки 1–2) содержат передатчики Tx с модуляцией QPSK, когерентные фотоприемные устройства (ФПУ) PSK / QAM Receiver (универсальные приемники для сигналов без поляризационного мультиплексирования), DSP, вращатели поляризации (Polarization Rotator), поляризационные фазовращатели (Polarization Phase Shift), полосовые оптические фильтры Баттерворта (Butterworth Filter). Для контроля за процессами в моделируемой схеме используются оптические приборы: ваттметры (Power Meter), осциллографы (OTDV), спектроанализаторы (OSA), анализаторы поляризации (Polarization Analyzer), а также электрические анализаторы сигнальных созвездий (Constellation Analyzer).

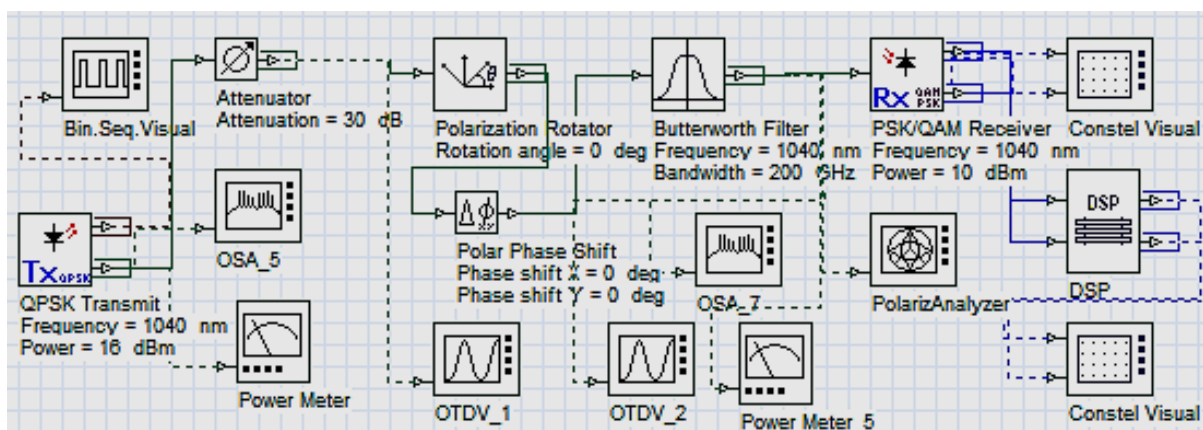


Рис. 1. Схема моделирования FSO

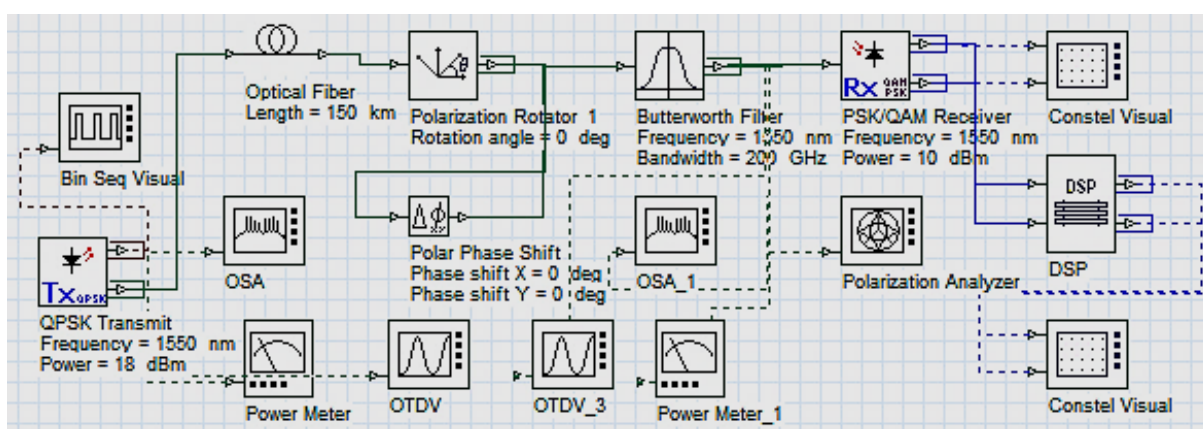
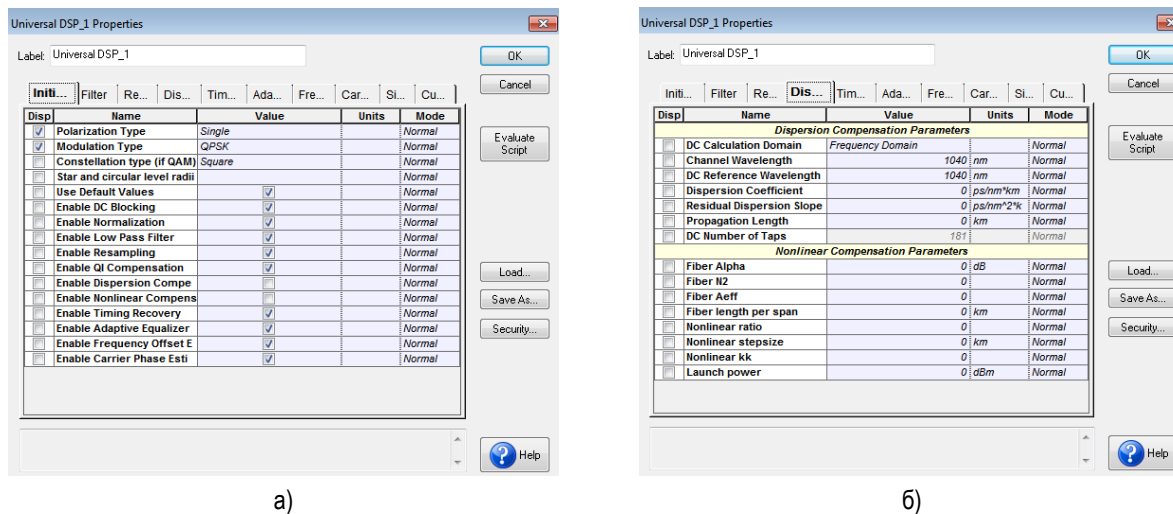


Рис. 2. Схема моделирования ВОСС

Предварительный анализ FSO и ВОСС был проведен до начала основных исследований. Были выбраны уровни мощности передатчиков – 16 (FSO) и 18 дБм (ВОСС) так, чтобы уровни мощности на входах ФПУ несколько превышали их пороговые чувствительности. Для ВОСС, работающей на длине волны $\lambda_0 = 1550$ нм, использовались все стандартные алгоритмы и настройки DSP, для FSO были исключены алгоритмы компенсации хроматической дисперсии и нелинейных искажений. На рисунке 3 показаны алгоритмы ЦОС и настройки DSP для FSO в Optisystem.

Основные сравнительные исследования FSO и ВОСС сводились к определению зависимости качества связи, т. е. Q-фактора от внешних воздействий, к которым относятся:

- изменения состояния поляризации излучения, выходящего из передатчика;
- отклонения несущей частоты сигнала ν_0 от частоты гетеродина ν_g .



а) б)
Рис. 3. Перечень алгоритмов ЦОС (а) и настроек DSP (б) для FSO

Изменения состояния поляризации излучения передатчика

Исследования проводились для линейной поляризации с различными азимутами, а также для круговой поляризации излучения передатчика. Исходные данные и результаты исследований приведены в таблице 1. Во всех исследованиях сохранялся средний уровень сигнала на входе ФПУ равный $-22,7$ и $-20,8$ дБм для FSO и BOCC, соответственно.

Таблица 1. Исходные данные и результаты исследований

№	Установленные параметры						Измеренные величины		
	Система	α_0 , град.	β_0 , град.	φ_x , град.	θ , град.	$\Delta\nu_\phi$, ГГц	Q	α , град.	β , град.
1	FSO	0	0	0	0	100	6,7	0	0
	BOCC	0	0	0	0	100	8,0	—	—
2	FSO	30	0	0	0	100	9,0	30	0
	BOCC	45	0	0	0	100	8,0	—	—
3	FSO	45	0	0	0	100	9,3	45	0
	BOCC	45	0	0	0	100	8,0	—	—
4	FSO	60	0	0	0	100	9,0	60	0
	BOCC	90	0	0	0	100	6,7	90	0
5	FSO	0	45	0	0	100	6,7	-88,4	45
	BOCC	0	45	0	0	100	8,0	—	—
6	FSO	30	45	0	0	100	6,7	-88,4	45
	BOCC	45	45	0	0	100	6,7	-88,4	45
7	FSO	60	45	0	0	100	6,7	-88,4	45
	BOCC	90	45	0	0	100	6,7	-88,4	45
8	FSO	0	45	0	0	100	6,7	-88,4	45
	BOCC	45	45	45	0	100	8,6	45	22,5
9	FSO	45	45	30	0	100	8,1	45	30
	BOCC	45	45	60	0	100	9,0	45	15
10	FSO	45	45	90	0	100	9,2	45	0
	BOCC	45	45	90	0	100	7,0	—	—
11	FSO	45	45	90	30	100	9,2	45	0
	BOCC	45	45	90	90	100	8,0	—	—
12	FSO	45	45	90	180	100	9,3	45	0
	BOCC	45	45	90	0	1000	10.3	45	0
13	FSO	45	45	90	0	200	9.8	45	0
	BOCC	45	45	90	0	200	9.8	45	0

В исследованиях с номерами от 1 до 5 изменялся азимут линейной поляризации α_0 от 0° до 90° . В системе FSO излучение, поступающее на вход ФПУ, имело такую же поляризацию. Обнаружена зависимость качества связи (Q-фактора) от азимута линейной поляризации на входе ФПУ, что нежелательно для приемника FSO. Максимальное значение $Q = 9,3$ наблюдалось при $\alpha_0 = 45^\circ$, а минимальное $Q = 6,7$ при $\alpha_0 = 0^\circ$ и 90° .

Измерения Q-фактора для ВОСС в этих и последующих исследованиях показали значительный разброс от измерения к измерению при одинаковых условиях. Также наблюдался большой разброс результатов измерения состояния поляризации на входе ФПУ (азимута α и эллиптичности β). Поэтому параметры состояния поляризации на входе ФПУ для ВОСС (α и β) в таблицу не заносились, а значения Q-фактора усреднялись по результатам пяти измерений.

В исследованиях с номерами от 6 до 18 использовалась круговая поляризация излучения на выходе передатчика. Для этого эллиптичность излучения передатчика устанавливалась равной 45° . Это позволило исключить зависимость качества связи в FSO от азимута исходного излучения лазера передатчика α_0 (строки 6–11). Однако полученное значение $Q = 6,7$ соответствует его минимальному значению в предыдущих исследованиях.

Далее исследовалось влияние на качество связи установки поляризационного фазовращателя с углом φ_x для x -составляющей поляризации (строки 12–15). При $\varphi_x = 90^\circ$ было достигнуто максимальное значение $Q = 9,2$ для FSO. При этом излучение на входе ФПУ приобрело линейную поляризацию ($\beta = 0$) и азимут равный 45° . Практически для преобразования круговой и эллиптической поляризации в линейную надо использовать четвертьволновую фазовую пластинку.

В строках 16–18 приведены результаты исследования влияния на качество связи в FSO вращения азимута поляризации θ в поляризационном ротаторе (ячейке Фарадея). В данном случае с помощью ячейки Фарадея моделируется взаимное вращение КА относительно оси — прямой линии, соединяющей оптические антенны передатчика и приемника. Видно, что при использовании круговой поляризации на выходе передатчика FSO вращение поляризации не влияет на качество связи.

В строках 19–20 исследовалось влияние на качество связи в FSO ширины полосы пропускания оптического фильтра $\Delta\nu_\phi$. Видно, что с увеличением полосы качество связи растет от $Q = 9,2$ в строке 15 до $Q = 10,3$ в строке 19.

Отклонения несущей частоты сигнала ν_0 от частоты гетеродина ν_g

Отклонения $\Delta\nu$ несущей частоты оптического сигнала ν_0 от частоты гетеродина ν_g могут возникать из-за случайных изменений частот лазеров в передатчике и приемнике (частота гетеродина), а также из-за эффекта Доплера, возникающего в результате взаимных быстрых перемещений КА со скоростью $V_{КА}$. Доплеровское смещение частоты ν_0 можно определить по выражению:

$$\Delta\nu_D = \nu_0 \cdot V_{КА}/c,$$

где c — скорость света в вакууме.

Максимально допустимую взаимную скорость сближения или удаления КА $V_{КА_max}$ можно оценить по отклонению частоты $\Delta\nu$:

$$V_{КА_max} = \Delta\nu \cdot c / \nu_0.$$

Исходные данные, результаты расчетов и исследований приведены в таблице 2. Во всех исследованиях и расчетах использовались значения: $\alpha_0 = 45^\circ$, $\theta = 0$ и $\Delta\nu_\phi = 100$ ГГц.

Из полученных результатов видно, что максимально допустимое отклонение несущей частоты по отношению к частоте гетеродина ($\Delta\nu$) составляет примерно 30 и 20 ГГц для FSO и ВОСС, соответственно. Максимальные проекции скорости сближения или удаления КА на линию, соединяющую передающую и приемную антенны FOS ($V_{КА_max}$), составляют примерно 34 и 38 км/с.

Таблица 2. Исходные данные и результаты исследований

№	Установленные параметры				Рассчитанные и измеренные величины				
	Система	β_0 , град.	λ_0 , нм	λ_g , нм	$\Delta\lambda$, нм	$\delta\lambda$, %	$\Delta\nu$, ГГц	$V_{КА_max}$, км/с	Q
1	FSO	45	1040	1040	0	0	0	0	9,3
	BOCC	45	1550	1040	0	0	0	0	8,0
2	FSO	45	1040,05	1040	0,05	$4,8 \cdot 10^{-3}$	13,8	14,3	8,4
	BOCC	45	1550,05	1550	0,05	$3,2 \cdot 10^{-3}$	6,2	9,6	7,0
3	FSO	45	1040,1	1040	0,1	$9,6 \cdot 10^{-3}$	27,6	28,6	7,2
	BOCC	45	1550,1	1040	0,1	$6,4 \cdot 10^{-3}$	12,4	19,2	7,0
4	FSO	45	1040,15	1040	0,15	$1,4 \cdot 10^{-2}$	41,4	42,9	1,7
	BOCC	45	1550,15	1550	0,15	$9,7 \cdot 10^{-3}$	18,6	28,8	5,5
5	FSO	45	1040,12	1040	0,12	$1,15 \cdot 10^{-2}$	33,1	34,3	5,2
	BOCC	45	1550,2	1550	0,2	$1,3 \cdot 10^{-2}$	24,8	38,4	4,3
6	FSO	45	1039,9	1040	-0,1	$-9,6 \cdot 10^{-3}$	-27,6	28,6	7,1
	BOCC	45	1549,9	1550	-0,1	$-6,4 \cdot 10^{-3}$	-12,4	19,2	7,0
7	FSO	45	1039,88	1040	-0,12	$-1,15 \cdot 10^{-2}$	-33,1	34,3	4,7
	BOCC	45	1549,8	1550	-0,2	$-1,3 \cdot 10^{-2}$	-24,8	38,4	4,7

Выводы

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Во-первых, показана возможность использования и даже упрощения для FSO алгоритмов и программного обеспечения существующих DSP для BOCC с КП. При этом эффективность ЦОС в DSP для FSO и BOCC примерно одинакова.

Во-вторых, установлено, что использование круговой поляризации вместо линейной на выходе передатчика FSO позволяет исключить влияние вращения поляризации на качество связи. Уменьшение Q-фактора при этом может быть скомпенсировано поляризационным фазовращателем, преобразующим круговую поляризацию принимаемого сигнала в линейную.

В-третьих, определены максимально возможные отклонения несущей частоты излучения передатчика от частоты гетеродина, а также максимальные скорости сближения или удаления КА, которые ограничены эффектом Доплера.

Литература

1. 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
2. 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
3. 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
4. Трещиков В. Н., Листвин В. Н. DWDM системы. М.: Техносфера, 2021. 420 с.
5. Near-Earth Laser Communications / Ed. by H. Hemmati. CRC Press, 2020. 466 p. DOI: 10.1201/9780429186721

Статья поступила 17 июля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 05 августа 2025 г.
Принята к публикации 26 января 2026 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»

Digital Signal Processing in an Optical Communication System between Spacecraft

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

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

²SUPERTEL, OJSC,
St. Petersburg, 197046, Russian Federation

Problem statement. *In optical communication systems between spacecraft, which can be tens of thousands of kilometers long, a coherent reception method must be used. The most important component of coherent systems is a digital signal processor, which executes algorithms for digital processing of received signals. This paper examines the possibility of using a standard processor developed for fiber-optic communication systems in space systems. Purpose of the paper is to compare the efficiency of digital signal processing by identical digital signal processors in single-channel coherent space and fiber-optic communication systems with a transmission rate of 100 Gbit/s and four-level phase modulation. Methods.* To solve the stated problem, mathematical modeling of communication systems in the Optisystem environment was applied. **Results.** A study was conducted on the efficiency of digital processing of signals that have experienced attenuation, as well as frequency, phase, and polarization distortions. **Practical relevance.** It is shown that the software of modern digital signal processors not only allows for efficient processing of signals in space communication systems, but can also be simplified.

Key words: open-space optical communication systems, digital signal processor, coherent receiving of digital optical signals, spacecraft

Information about Authors

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

Gragolev Sergey – Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). Email: Glagolev.Sergey@sut.ru

Gordiychuk Irina – Postgraduate Student of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruevich 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, OJSC)