

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-09-5-17

УДК 681.7

Особенности построения оптико-механического тракта дуплексной космической оптической линии связи

Евгений Петрович Меснянкин¹, Сергей Леонтьевич Потапов²,
Нина Ивановна Потапова³✉

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор
Ленинградской обл., Россия

¹mesnjankinEP@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0001-8777-5308>

²potapovSL@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-6735-0959>

³potapovaNI@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-0520-2077>

Аннотация

Предмет исследования. Схемы построения оптико-механического тракта дуплексной лазерной космической связи (с общим приемо-передающим каналом и с отдельными каналами приема и передачи). **Цель работы.** Разработка оптико-механического тракта для создания космической оптической линии связи при использовании промышленно выпускаемых источников и приемников излучения, применяемых в волоконно-оптических линиях связи, с учетом особенностей распространения лазерного излучения в космическом пространстве при больших дистанциях, на которых устанавливается связь, и скоростях передаваемой информации до 11 Гбит/с. **Метод.** Численное моделирование основных узлов оптико-механического тракта, в том числе, формирования гауссовых пучков и определения энергетических характеристик информационного излучения в приемном канале, формирования излучения сигнала лазера-маяка для точного наведения на терминал и удержания направления при осуществлении связи. **Основные результаты.** Предложена конструкция оптико-механического тракта для космической лазерной линии связи с системой наведения и сопровождения абонента, использующая в качестве передающих и приемных устройств трансиверы и волоконные усилители, разработанные для волоконно-оптических линий связи. Проведенные оценки точности наведения и сопровождения показывают возможность осуществления сеанса связи. Совокупность предложенных решений позволяет осуществлять лазерную связь на расстоянии до 40 000 км для передачи и приема информации со скоростью до 11 Гбит/с. **Практическая значимость.** Технические решения, предложенные в работе, позволяют проектировать космические терминалы для дуплексной лазерной связи с улучшенными массогабаритными и функциональными характеристиками. Результаты проведенного исследования развивают и дополняют существующие методы создания средств космической связи, что определяет их практическую значимость.

Ключевые слова: космическая лазерная связь, космические оптические линии связи, лазерное излучение, волоконно-оптическая линия связи, оптико-механический тракт, дуплексная связь

Ссылка для цитирования: Меснянкин Е.П., Потапов С.Л., Потапова Н.И. Особенности построения оптико-механического тракта дуплексной космической оптической линии связи // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 9. С. 5–17. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-5-17>

Коды OCIS: 070.0070, 120.0120, 140.0140, 200.0200, 230.0230, 250.0250

Design features of optical-mechanical path of a duplex space optical communication line

EVGENII P. MESNJANKIN¹, SERGEI L. POTAPOV², NINA I. POTAPOVA³✉

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,
Leningrad region, Russia

¹mesnjankinEP@niiioep.ru <https://orcid.org/0000-0001-8777-5308>

²potapovSL@niiioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-6735-0959>

³potapovaNI@niiioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-0520-2077>

Abstract

Subject of study. Design diagrams for an optical-mechanical path for duplex laser space communication (with a common receiving and transmitting channel and with separate receiving and transmitting channels). **Aim of study.** Design of an optical-mechanical path for a space optical communication line using commercially available radiation sources and receivers used in fiber-optic communication lines with due regard for the peculiarities of the propagation of laser radiation in outer space at long distances at which communication is established and the speeds of transmitted information up to 11 Gbit/s. **Method.** Numerical modeling of the optical-mechanical path main components, including the Gaussian beams forming and determination of the information radiation output performance in the receiving channel, the formation of radiation from a laser-beacon signal for accurate guidance to the terminal and direction holding during communication. **Main results.** The design of an optical-mechanical path for a space laser communication line with a guidance and tracking system using transceivers and fiber amplifiers developed for fiber-optic communication lines as transmitting and receiving devices is proposed. The conducted assessments of the accuracy of guidance and tracking show the possibility of a communication session. The combination of the proposed solutions allows for laser communication at distances up to 40,000 km for transmitting and receiving information at speeds up to 11 Gbit/s. **Practical significance.** The technical solutions proposed in the work make it possible to design space terminals for duplex laser communication with the enhanced weight and dimensional characteristics and performance. The results of the conducted research develop and complement the existing approaches to space communication facilities design, which determines their practical significance.

Keywords: space optical laser communication, laser radiation, fiber-optic communication line, optical-mechanical path, duplex communication

For citation: Mesnjankin E.P., Potapov S.L., Potapova N.I. Design features of optical-mechanical path of a duplex space optical communication line [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 9. P. 5–17. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-5-17>

OCIS codes: 070.0070, 120.0120, 140.0140, 200.0200, 230.0230, 250.0250

ВВЕДЕНИЕ

Результаты масштабных исследований, проводимых как за рубежом, так и у нас в стране, позволили сформировать концепцию открытой оптической системы передачи информации в космосе, возможность реализации которой подтверждена созданием ряда действующих устройств космической оптической линии связи (КОЛС) [1–11, 12].

В современных проектах космической лазерной связи в качестве передатчика рассматривают схему с полупроводниковым лазером в качестве задающего генератора и оконч-

ным волоконным усилителем с диодной накачкой. Для передачи информации сигнал задающего генератора модулируется внешним модулятором, например, внешним электрооптическим модулятором — интерферометром Маха–Цендера на кристаллах ниобата лития, что обеспечивает высочайшие линейность и динамический диапазон устройства. Впервые такая схема была предложена при разработке терминала КОЛС, созданного в рамках проекта демонстрации лазерной связи с орбиты Марса «Mars Laser Communication Demonstration» [13–15]. В этом терминале в качестве задаю-

щего генератора использовался перестраиваемый диодный лазер с распределенной петлей обратной связи, перестраиваемый в диапазоне длин волн от 0,7 до 1,6 мкм, с выходной мощностью излучения от 20 до 25 мВт. В качестве оконечного усилителя использовался волоконный эрбиевый усилитель (длина волны 1,55 мкм), позволяющий получить на выходе мощность излучения 5 Вт. Главное зеркало оптического телескопа имело диаметр 30 см. Эти разработки легли в основу реализуемого в данный момент проекта канала космической лазерной связи по линии орбита Луны — геостационарный спутник-ретранслятор — наземный приемный пункт (Проект NASA-LLCD (*Lunar Laser Communication Demonstration*) или LCRD (*Laser Communication Relay Demonstration*)) [16, 17].

Ключевыми вопросами при создании КОЛС является улучшение массогабаритных характеристик оптико-электронного тракта и увеличение объема передаваемой информации.

Одним из решений является применение элементной базы, лежащей в основе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), служащих для обмена информацией в наземных условиях. В ВОЛС в качестве среды, в которой распространяется несущее информацию модулированное лазерное излучение, используется оптическое волокно. Для обеспечения передачи информации через спутниковые системы связи необходимы соответствующие модули, работающие в космическом пространстве. Однако напрямую использовать при разработке КОЛС методы, лежащие в основе создания ВОЛС, нельзя, поскольку существует ряд особенностей, связанных с распространением лазерного излучения в свободном пространстве.

Существенным отличием систем КОЛС от ВОЛС является то, что в КОЛС излучение распространяется в свободном пространстве с расходимостью, приводящей к уменьшению принимаемого сигнала. Это необходимо учитывать при выборе схемных решений построения КОЛС. Кроме того, существует необходимость наведения приемного и передающего терминалов КОЛС друг на друга в режиме приема-передачи информации, а также их сопровождения и компенсации уходов оптической оси при вибрациях носителя. Так как модули КОЛС в процессе своего движения по

орбитам непрерывно смещаются друг относительно друга, а расстояния между модулями значительны, перечисленные выше функции должны реализовываться с учетом углов упреждения. Кроме того, в КОЛС необходима разработка методов, обеспечивающих развязку до 70–80 дБ приемных и передающих оптических каналов.

Ответ на эти вопросы требует дополнительных исследований и проработки.

Целью работы является разработка оптико-механического тракта для создания КОЛС при использовании промышленно выпускаемых источников и приемников излучения, применяемых в ВОЛС, с учетом особенностей распространения лазерного излучения в космическом пространстве при больших дистанциях, на которых устанавливается связь, и скоростях передаваемой информации до 11 Гбит/с.

ВАРИАНТЫ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

В статье рассматриваются варианты реализации КОЛС в околоземном пространстве (на расстояниях до 4000 км) и связи с космическим аппаратом (КА), расположенным на геостационарной орбите (расстояние до 40 000 км).

Рассматриваются два наиболее перспективных, с точки зрения авторов, варианта исполнения терминалов КОЛС — с общим приемо-передающим каналом и с отдельными каналами приема и передачи [9].

Вариант исполнения с отдельными приемным и передающим каналами по сравнению со схемой с общим приемо-передающим каналом позволяет разнести функциональные узлы так, чтобы исключить возможность попадания рассеянного излучения из передающего канала в приемный. Однако за счет этого могут увеличиться массогабаритные характеристики КОЛС по сравнению со схемой с общим приемо-передающим каналом.

В рассматриваемых схемах оптико-механического тракта (ОМТ) используется современная элементная база: в качестве передающих и приемных устройств рабочего лазерного излучения используются трансиверы [9, 18], усиление выходной мощности обеспечивают оптоволоконные усилители, применяемые в протяженных ВОЛС [19].

ВАРИАНТ ИСПОЛНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ТРАКТА КОСМИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ С ОБЩИМ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИМ КАНАЛОМ

На рис. 1 приведена оптическая схема ОМТ КОЛС с общим приемо-передающим каналом.

Передающий канал имеет два лазерных источника — рабочий (информационный), передающий канал трансивера, работающий на длине волны излучения 1,55 мкм, и лазер-маяк, работающий на длине волны 1,06 мкм.

Лазер-маяк располагается в передающем канале, его излучение используется для наведения телескопической системы (ТС) КА абонента, с которым планируется сеанс лазерной связи, на котором расположен аналогичный лазер-маяк. Излучение лазера-маяка от терминала первого абонента проходит через блок упреждения, отражается от светоделителя, расположенного под углом 45°. Затем отраженное излучение проходит через два дефлектора — сопровождения и компенсации вибраций, и выходит через формирующий телескоп для облучения терминала второго абонента при его поиске. Сигнал от этого лазера-маяка регистрируется квадрантным фотоприемным устройством, работающим на длине волны 1,06 мкм, находящимся на втором аналогичном терминале, от которого через блок управления сопровождением поступают сигналы на дефлектор сопровождения: это необходимо для того чтобы точно навестись на терминал абонента.

Рабочее лазерное излучение из двухканального трансивера поступает в оптоволоконный усилитель, проходит блок упреждения, который с применением дефлектора упреждения и блока управления упреждением составляет систему допоиска объекта (излучение попадает на координатно-чувствительный приемник, который используется для контроля угла поворота дефлектора). Одним из важных элементов в приемо-передающем тракте является светоделитель, имеющий в центре зеркальное покрытие с коэффициентом отражения, близким к 100%, а по окружности — просветляющее покрытие, обеспечивающее пропускание излучения с длинами волн 1,06 и 1,55 мкм практически 100%. Пройдя через дефлектор сопровождения и дефлектор ком-

пенсации вибраций, излучение выходит через формирующий объектив ТС для передачи информации абоненту.

Принятый сигнал рабочего излучения от абонента на втором терминале проходит аналогичный путь сигналу лазера-маяка до оптического клина, после отражения от которого рабочее излучение попадает в оптоволоконный усилитель, а затем информация регистрируется приемником двухканального трансивера.

Для улучшения развязки приемного и передающего каналов в ОМТ (рис. 1) кроме светоделителя используется пространственное разделение излучения приемного и передающего каналов, осуществляемое за счет конструкции ТС. Она конструируется таким образом, чтобы выходное излучение проходило через центральную зону ТС, а входное — через краевую. При этом площади апертур приемного и передающего каналов выбираются одинаковыми. В этом случае диаметр апертуры части объектива передающего канала будет равен $D = D_{TS}/\sqrt{2}$, где D_{TS} — диаметр апертуры объектива ТС. Апертура приемного канала будет представлять собой кольцо с внешним диаметром, равным D_{TS} , и внутренним диаметром, равным D . Однако и этих мер недостаточно, чтобы получить развязку каналов до 70–80 дБ, поскольку мощное излучение передающего канала, рассеиваясь на элементах конструкции, попадает в приемный канал, и при осуществлении связи на больших расстояниях принимаемый сигнал становится соизмерим, а то и меньше, сигнала рассеянного излучения. Для улучшения развязки целесообразно делать ОМТ КОЛС с отдельными приемным и передающими каналами.

ВАРИАНТ ИСПОЛНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ТРАКТА КОСМИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ С РАЗДЕЛЬНЫМИ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИМИ КАНАЛАМИ

Оптические схемы приемного и передающего каналов КОЛС с отдельными каналами (рис. 2) идентичны по функциональному действию и элементной базе схеме КОЛС с общим приемо-передающим каналом (рис. 1).

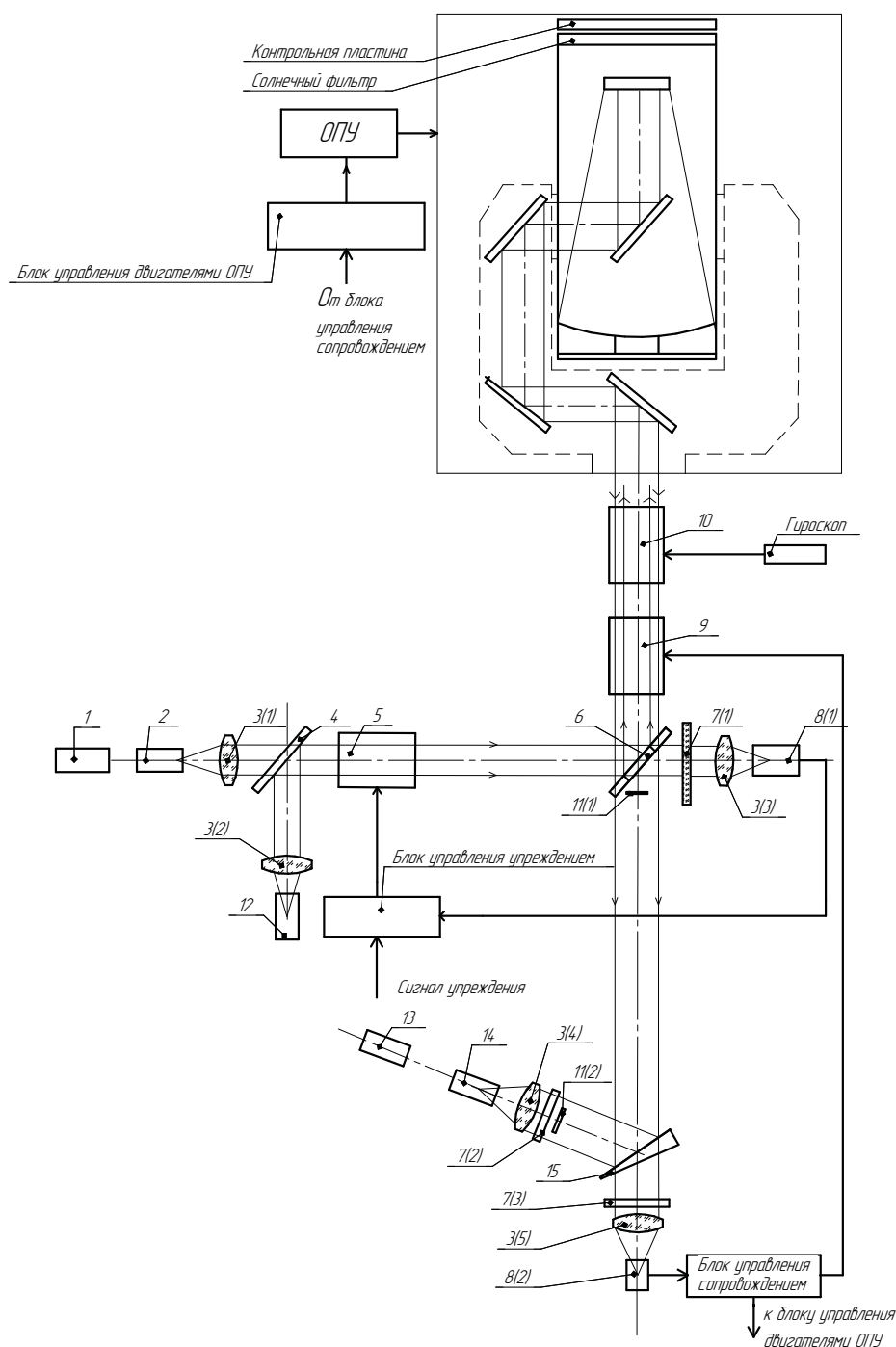


Рис. 1. Оптическая схема ОМТ КОЛС с общим приемо-передающим каналом (вариант 1). 1 — передатчик трансивера, 2 — оптоволоконный усилитель, 3(1)÷3(5) — объектив, 4 — дихроичный светоделитель, 5 — дефлектор упреждения, 6 — светоделитель, 7 — интерференционный светофильтр, 8(1)÷8(2) — координатно-чувствительный приемник, 9 — дефлектор сопровождения, 10 — дефлектор компенсации вибраций, 11(1)÷11(2) — поглощающий экран, 12 — лазер-маяк, 13 — приемник трансивера, 14 — оптоволоконный усилитель, 15 — клин. ОПУ — опорно-поворотное устройство

Fig. 1. Optical circuit of optical-mechanical path of the space optical communication line with a common receiving and transmitting channel (option 1). (1) Transceiver transmitter, (2) fiber optic amplifier, (3(1)÷3(5)) lens, (4) dichroic beam splitter, (5) lead deflector, (6) beam splitter, (7) interference light filter, (8(1)÷8(2)) coordinate-sensitive receiver, (9) tracking deflector, (10) vibration compensation deflector, (11(1)÷11(2)) absorbing screen, (12) laser beacon, (13) transceiver receiver, (14) fiber optic amplifier, (15) wedge. ОПУ means support slewing device (SSD)

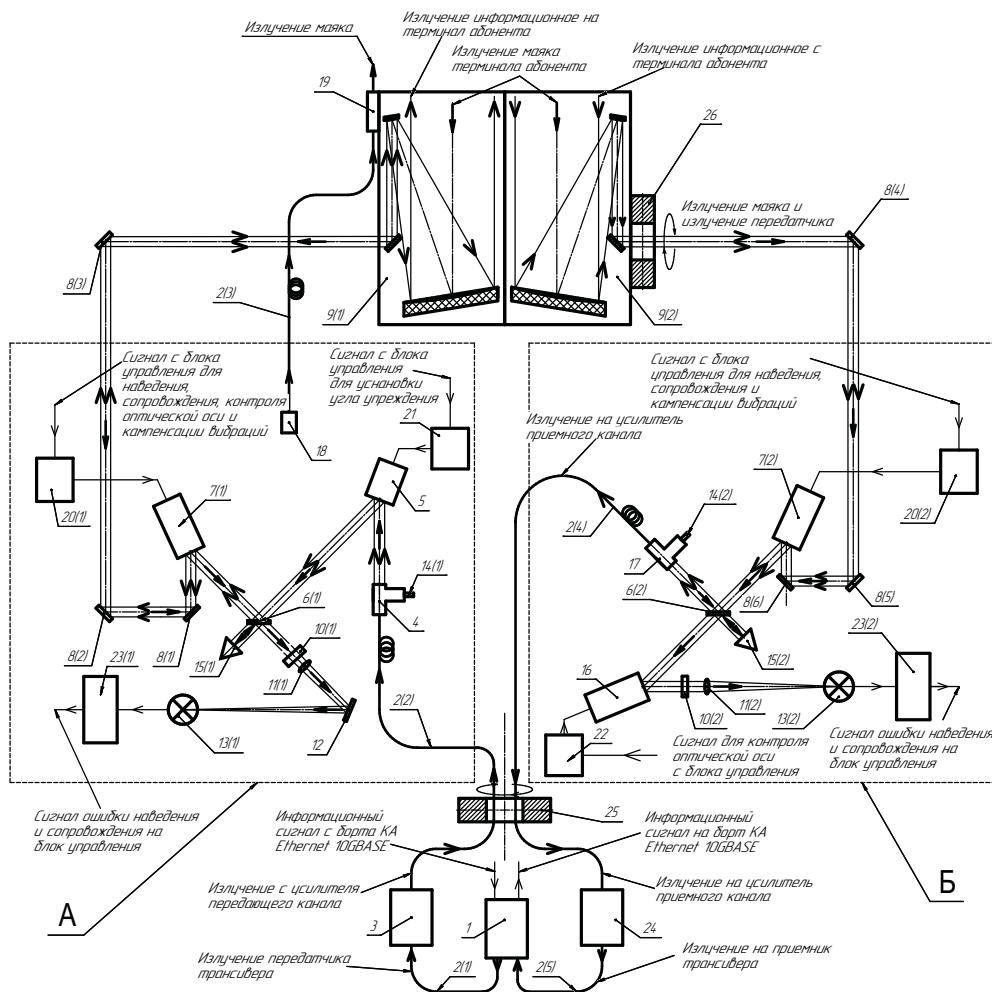


Рис. 2. Оптическая схема варианта исполнения КОЛС с отдельными передающим (А) и приемным (Б) каналами (вариант 2). 1 — трансивер, 2 — оптоволокно, 3 — усилитель передающего канала, 4 — двунаправленный разветвитель излучения передающего канала, 5 — дефлектор упреждения, 6 — дихроичное зеркало, 7 — дефлектор наведения, сопровождения и компенсации вибраций, 8 — поворотное зеркало, 9 — ТС, 10 — узкополосный интерференционный светофильтр, 11 — объектив, 12 — поворотное зеркало для длины волны излучения 830 нм, 13 — квадрантный фотодиод, 14 — излучатель пилот-сигнала (маломощный лазерный диод), 15 — световозвращатель, 16 — дефлектор контроля оптической оси, 17 — двунаправленный разветвитель излучения приемного канала, 18 — лазерный диод канала маяка, 19 — объектив канала маяка, 20 — блок управления дефлектором наведения, сопровождения и компенсации вибраций, 21 — блок управления дефлектором установки угла упреждения, 22 — блок управления дефлектором контроля оптической оси, 23 — микроконтроллер для формирования цифрового сигнала погрешности наведения и сопровождения, 24 — усилитель приемного канала, 25 — двигатель ОПУ для поворота по азимуту в пределах $\pm 180^\circ$, 26 — двигатель ОПУ для поворота по углу места в пределах $\pm 90^\circ$

Fig. 2. Optical scheme of the space optical communication line, version with separate transmitting (A) and receiving (B) channels (option 2). (1) Transceiver, (2) optical fiber, (3) amplifier of the transmitting channel, (4) bidirectional radiation splitter of the transmitting channel, (5) deflector of anticipation, (6) dichroic mirror, (7) deflector of guidance, tracking and vibration compensation, (8) rotary mirror, (9) telescopic system, (10) narrowband interference light filter, (11) lens, (12) rotary mirror for a wavelength of 830 nm, (13) quadrant photodiode, (14) pilot signal emitter (low-power laser diode), (15) retroreflector, (16) optical axis control deflector, (17) bidirectional radiation splitter of the receiving channel, (18) laser diode of the beacon channel, (19) lens of the beacon channel, (20) control unit for guidance, tracking and vibration compensation deflector, (21) control unit for the deflector of the pre-emption angle setting, (22) control unit for the optical axis control deflector, (23) microcontroller for generating a digital guidance and tracking error signal, (24) receiving channel amplifier, (25) SSD engine for azimuth rotation within $\pm 180^\circ$, (26) SSD engine is designed to rotate along the angle of the place within $\pm 90^\circ$

Алгоритм работы передающего канала с системой наведения (на примере варианта 2)

Рассмотрим алгоритм работы КОЛС между двумя КА, на которых расположены терминалы с аппаратурой, осуществляющей оптическую связь между КА. Терминал, работу которого будем описывать, назовем терминалом «А», а удаленный терминал, с которым должна осуществляться связь, назовем терминалом «Б» (см. рис. 2).

Передающий канал работает следующим образом. Излучение от передатчика трансивера через оптоволокно попадает на вход оптического усилителя. Затем усиленное излучение проходит по второму оптоволокну, после прохождения через которое коллимируется двуправленным разветвителем излучения и попадает на зеркало дефлектора упреждения. При дальнейшем распространении излучение отражается от зеркала дефлектора, дихроичного зеркала, дефлектора сопровождения и от трех поворотных зеркал, после этого оно попадает на вход. Дефлектор наведения и сопровождения и ТС, расположенная на опорно-поворотном устройстве (ОПУ), служат для наведения излучения на удаленный терминал, с которым поддерживается связь. Основное грубое наведение на удаленный терминал Б осуществляется по информации о положении КА, поступающей от центра управления полетами, с помощью ОПУ, на котором расположена ТС. Точное наведение проводится по излучению маяка. Угловая ширина диаграммы направленности излучения маяка может находиться в пределах от 1 до 3'. Следовательно, погрешность определения положения КА должна соответствовать этим значениям. При точном наведении должно происходить наведение диаграммы направленности излучения информационного канала на терминал Б. Так как ширина диаграммы направленности информационного канала находится в пределах нескольких угловых секунд, то для начала сеанса связи необходимо наведение визирной оси с погрешностью не более долей ширины диаграммы направленности, т.е. в пределах от 0,5 до 1". Это должно осуществляться дефлектором сопровождения.

Алгоритм работы системы точного наведения заключается в следующем. Излучение маяка от терминала Б попадает на объектив

ТС. Затем оно проходит через ТС, отражается от трех поворотных зеркал, дефлектора сопровождения и проходит через дихроичное зеркало, после этого фокусируется объективом на приемную поверхность квадрантного фотодиода. Поворотное зеркало служит для излома оптической оси, что необходимо для уменьшения габаритов оптической системы передающего канала.

Узкополосный интерференционный светофильтр, через который проходит излучение, устраняет фоновые засветки на квадрантном фотодиоде. Приемная площадка фотодиода должна быть расположена в плоскости, близкой к фокальной плоскости объектива, чтобы положение пятна излучения на поверхности фотодиода определялось направлением, с которого пришло излучение маяка терминала Б. При сборке и юстировке системы точного наведения фотодиод устанавливается таким образом, чтобы излучение, попадающее на ТС по ее оптической оси, фокусировалось в центре приемной площадки фотодиода.

Оптическая схема передающего канала должна быть съюстирована таким образом, чтобы излучение передатчика выходило из ТС по ее оптической оси. В этом случае, если оптическая система терминала А, состоящая из ТС и дефлектора сопровождения, наведена на терминал Б так, что излучение от маяка этого терминала попадает в центр квадрантного фотодиода, то тогда излучение маяка терминала А будет направлено точно на терминал Б. Если излучение от маяка терминала Б будет попадать не в центр квадрантного фотодиода, то тогда с помощью микроконтроллера, на вход которого поступают сигналы с квадрантного фотодиода, вырабатывается цифровой сигнал, поступающий на вход блока управления терминалом КОЛС. От него на блок управления дефлектором наведения и сопровождения поступает такой управляющий сигнал, в результате которого этот блок поворачивает зеркало дефлектора так, что излучение от маяка наводится в центр приемной площадки фотодиода. Если на терминале Б будет сделано то же самое по отношению к излучению маяка терминала А, то тогда обе оптические системы передающих каналов будут наведены друг на друга и, следовательно, можно будет проводить сеанс оптической связи между КА.

При попадании пятна излучения в центр квадрантного фотоприемника сигнал погрешности будет равен нулю.

Ввиду больших скоростей движения КА между направлениями, с которого пришел сигнал с терминала Б и по которому должен передаваться сигнал на этот терминал, необходимо вводить угол упреждения. Для этого служит дефлектор упреждения. Значение угла упреждения зависит от скоростей, с которыми движутся КА: от их абсолютной величины и от их направления. Так как не предполагается определение скоростей движения КА с помощью средств терминалов, то, следовательно, значения этих скоростей или размер необходимого угла упреждения должны передаваться на терминалы извне. В соответствии с этой информацией в блоке управления формируется необходимый сигнал, который подается на блок управления дефлектором упреждения.

ВОЗМОЖНОСТЬ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ СВЯЗИ НА РАССТОЯНИЯХ ОТ 4000 ДО 40 000 КМ

Основные параметры разработанных вариантов построения КОЛС приведены в табл. 1.

В качестве источника лазерного излучения в описываемой конструкции терминалов КОЛС использован трансивер EOLP-1596-A-RN производства *Eoptolink Technology Inc. Ltd.* Передатчик трансивера обеспечивает скорость передачи данных до 11,3 Гб/с. Средняя выходная мощность излучения лежит в диапазоне от 1,5 до 5 дБм с центральной длиной волны излучения 1550 нм. Чувствительность приемника трансивера EOLP-1596-A-RN составляет $-24,5$ дБм¹.

Для реализации КОЛС на рассматриваемых расстояниях мощности излучения передатчика трансивера и чувствительности его приемника недостаточно. Поэтому необходимо использовать оптические усилители как в канале передатчика, так и в канале приемника.

На основе анализа имеющихся в продаже усилителей для оптической связи на расстоянии до 4000 км были выбраны следующие

Таблица 1. Характеристики КОЛС
Table 1. Space optical communication line characteristics

Параметр	Значение
Длина волны передатчика трансивера, мкм	1,55
Мощность передатчика для дальности связи до 4000 км, Вт	10
Мощность передатчика для дальности связи до 40000 км, Вт	20
Угловое поле для режима связи, погрешность наведения и удержания, угл. с	4
Скорость приема-передачи информации (связь полный дуплекс), Гбит/с	11,3
Диаметр объектива ТС для дальности связи до 4000 км, мм	70 (вариант 1) 50 (вариант 2)
Диаметр объектива ТС для дальности связи до 40 000 км, мм	130 (вариант 1) 90 (вариант 2)
Мощность передатчика маяка, Вт	1
Угол расходимости излучения маяка, угл. мин	3

оптические усилители производства *Connet Laser Technology Co., Ltd*:

– для канала передачи — высокоомощный волоконный усилитель серии MARS, MFAP-1550-M-SF-HP с выходной мощностью до 10 Вт, работающий в диапазоне длин волн 1,5 мкм,

– для приемного канала — малощумящий усилитель с малой пороговой чувствительностью по входному сигналу серии MARS,

– для реализации КОЛС на расстоянии до 40 000 км требуются более мощный усилитель в канале передатчика и более чувствительный усилитель в канале приемника. Для этой цели подходят оптические усилители CEFA-C-PB-HP с мощностью излучения на выходе до 20 Вт и EDFA-CEFA-C-BD с минимальной чувствительностью на входе до 10^{-8} Вт (опционально до 10^{-9} Вт).

Для выбранных трансивера и оптических усилителей был проведен расчет, обосно-

¹ Децибел-милливатт — мощность в децибелах, измеренная относительно 1 милливатта.

вызывающий возможность создания КОЛС на их основе, при осуществлении связи на расстояниях от 4000 до 40 000 км. При расчете предполагалось, что излучение после ТС имеет распределение Гаусса. В этом случае мощность излучения, попадающая на вход усилителя приемного канала терминала, составит

$$P(\alpha) = \frac{2P_{tr}\tau_1\tau_2}{\pi\alpha_0^2} \exp\left[-2\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^2\right] d\Omega. \quad (1)$$

Здесь P_{tr} — мощность излучения передатчика, τ_1, τ_2 — коэффициенты пропускания оптических систем приемного и передающего каналов (при расчетах брались равными 0,7), $\alpha_0 = M^2\lambda 2\beta/(\pi D)$ — угол расходимости излучения, где M^2 — параметр, характеризующий качество лазерного пучка (превышение расходимости по сравнению с дифракционной), D — диаметр апертуры объектива ТС передающего канала, λ — длина волны излучения, $d\Omega = \pi D^2/(4L^2)$ — телесный угол, под которым виден объектив приемного канала терминала абонента, где L — расстояние между терминалами КОЛС.

Максимальная мощность излучения на объективе приемного канала будет в случае, если ось диаграммы направленности лазерного пучка попадает в центр объектива, она со-

ставляет $I(0)d\Omega$. При отклонении оси диаграммы направленности излучения на угол γ на объектив попадет мощность излучения $I(\gamma)d\Omega$. Угол γ определяет требуемую точность наведения оси излучения передатчика на терминал абонента и точность удержания ее в этом направлении в процессе связи.

Зависимость от γ минимальной мощности излучения передающего канала, при которой мощность излучения на входе усилителя приемного канала терминала абонента равна его пороговой мощности P_{th} , выражается как

$$P_{min}(\gamma) = \frac{8P_{th}}{\tau_1\tau_2} \left(\frac{M^2L\lambda\beta}{\pi D^2}\right)^2 \exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\gamma\pi D}{\lambda\beta M^2}\right)^2\right]. \quad (2)$$

На рис. 3а приведены требуемые минимальные мощности излучения передатчика в зависимости от допустимой погрешности наведения и удержания оси излучения на терминале абонента КОЛС при различных диаметрах объективов ТС двух вариантов КОЛС и расстоянии между КА 4000 км. Пороговая мощность бралась равной пороговой мощности усилителя MFAS-ER-C-M-<PW>-PA –40 дБм (10^{-7} Вт).

Для реализации КОЛС на расстоянии 40 000 км требуется более чувствительный усилитель (EDFA-CEFA-C-BD) в приемном канале и более мощный усилитель в канале

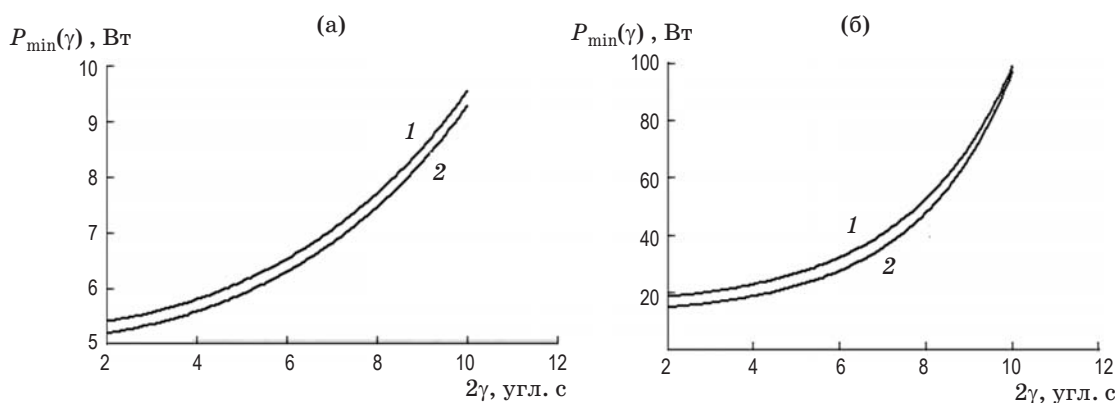


Рис. 3. Зависимости требуемой минимальной мощности излучения передатчика при диаметрах объективов ТС 70 мм (вариант 1 КОЛС — 1) и 50 мм (вариант 2 КОЛС — 2) и расстоянии между КА 4000 км (а) и при диаметрах объективов ТС 130 мм (вариант 1 КОЛС — 1) и 90 мм (вариант 2 КОЛС — 2) и расстоянии между КА 40 000 км (б)

Fig. 3. Dependences of the required minimum transmitter radiation power (a) for telescopic systems lens diameters of (option 1 of the space optical communication line, curve 1) 70 mm and (option 2 of the space optical communication line, curve 2) 50 mm at a distance between the spacecraft of 4000 km and (б) for telescopic systems lens diameters (option 1 of the space optical communication line, curve 1) 130 mm and (option 2 of the space optical communication line, curve 2) 90 mm at a distance between spacecraft of 40 000 km

передатчика (CEFA-C-PB-HP), а также необходимо увеличить диаметр апертуры ТС минимум до 90 мм. На рис. 3б приведены зависимости требуемой мощности излучения на выходе усилителя передающего канала от углов, соответствующих требуемой погрешности наведения, при различных диаметрах объективов ТС двух вариантов КОЛС и расстоянии до КА 40 000 км.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРА-МАЯКА И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЕГО ПРИЕМНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

В предлагаемом к исполнению варианте ОМТ КОЛС (при отдельно расположенном лазере маяка, имеющем свою формирующую оптическую систему, как это предлагается выполнить в варианте исполнения 2) для наведения терминалов КОЛС предполагается в качестве маяков использовать лазерные излучатели с мощностью излучения не менее 1 Вт, например, лазерный диод K830F02FNLLS-2.000W производства компании BWT Beijing Ltd с мощностью излучения до 2 Вт на длине волны 830 нм, близкой к максимуму чувствительности квадрантного фотодиода Hamamatsu S4349 (табл. 2), используемого в качестве приемника излучения маяка.

Мощность излучения маяка удаленного терминала P_{FD} , которая попадает на фотодиод, можно вычислить по следующей формуле:

$$P_{FD} = \frac{P_{ph}}{2} \frac{S_{obj}}{\Omega L^2} \tau^2, \quad (3)$$

где P_{ph} — мощность излучателя маяка, $S_{obj} = \pi D^2/4$ — площадь апертуры объектива ТС, $\Omega = \pi/4(\alpha_{0,5})^2$ — телесный угол, в котором распространяется половина мощности излучения маяка, $\alpha_{0,5}$ — полный угол, в котором сосредоточена половина мощности излучения лазера маяка, τ — пропускание оптических трактов приемного и передающего каналов маяка.

На рис. 4 приведены рассчитанные мощности излучения на фотодиоде приемного канала маяка в зависимости от углов расходимости излучения маяка. При расчете в случае расстояния между терминалами 4000 км диаметр объектива ТС — 50 мм, мощность из-

лучателя маяка — 1 Вт, пропускание оптических систем — 0,7.

Канал маяка служит для наведения визирных осей ТС терминалов друг на друга и для поддержания этого положения в процессе сеанса связи. Ширина частотного диапазона усилителя приемного канала ΔF не должна ограничивать требуемое быстродействие системы наведения. Наибольшие требования к быстродействию системы наведения будут, судя по

Таблица 2. Технические характеристики квадрантного фотодиода S4349

Table 2. Technical characteristics of the S4349 quadrant photodiode

Параметр	Значение
Спектральный диапазон работы фотодиода, нм	от 190 до 1000
Максимальная чувствительность на $\lambda = 720$ нм, А/Вт	0,45
Емкость p - n перехода фотодиода (при напряжении на фотодиоде 10 В), пФ	25
Эквивалентная шумовая мощность (NEP) на $\lambda = 720$ нм, Вт/Гц ^{1/2}	4×10^{-15}
Размер приемной площадки фотодиода, мм	3×3

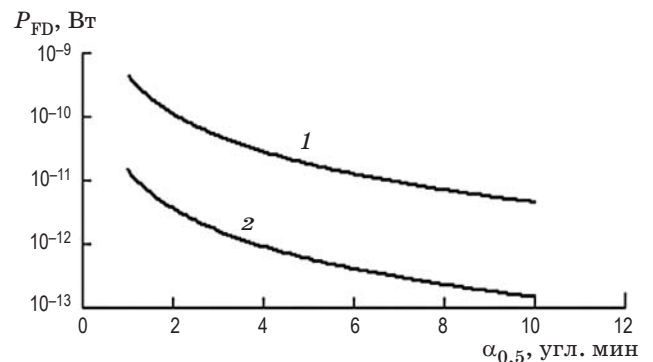


Рис. 4. Мощности излучения на приемной площадке фотодиода приемника маяка в зависимости от углов расходимости излучения маяка при расстояниях между КА 4000 (1) и 40 000 (2) км

Fig. 4. Radiation powers at the receiving area of the photodiode of the beacon receiver, depending on the divergence angles of the beacon radiation at a distance of between the spacecraft (1) 4000 and (2) 40 000 km

всему, вызваны необходимостью компенсировать вибрации КА. Поэтому ширина полосы пропускания канала маяка будет определяться максимальной частотой этих вибраций. Для оценок будем считать, что ширина полосы $\Delta F \sim 1000$ Гц. Отсюда получаем значение мощности шума на фотодиоде в этой полосе частот

$$P_{\text{noise}} = \text{NEP} \sqrt{\Delta F} = 1,3 \times 10^{-13} \text{ Вт.} \quad (4)$$

Сравнивая значение шумов на фотодиоде с мощностями излучения на приемной площадке фотодиода, представленными на рис. 4, можно увидеть, что мощность шума на фотодиоде значительно меньше мощности излучения на фотодиоде при всех рассматриваемых значениях ширины диаграммы направленности излучения передатчика маяка.

Проблема устранения влияния лазерного излучения маяка на информационный канал перед приемником (усилителем принимаемого излучения) решается установкой фильтра, отсекающего излучение с длинами волн, отличными от длины волны информационного канала. Такие фильтры могут иметь пропускание на рабочей длине волны до 99%, т.е. потерь в информационном канале из-за наличия излучения лазера маяка практически не будет. В предлагаемой конструкции используется дихроичное зеркало для разделения излучений информационного канала и канала маяка. Потери, вносимые зеркалом в информационный канал, не превышают 1%.

В работе проведена оценка возможности наведения на удаленный терминал, находящийся на расстоянии порядка 40 000 км, в зависимости от угла дифракционной расходимости излучения $\alpha_{0,5}$, в котором содержится половина энергии излучения лазера маяка. На рис. 4 приведены рассчитанные мощности излучения на квадрантном фотодиоде от маяка удаленного терминала, расположенного на расстоянии 40 000 км. Мощность излучения маяка бралась равной 1 Вт, а диаметр объектива — 90 мм.

Выше было показано, что мощность шума фотодиода в рабочей полосе частот усилителя составляет $1,3 \times 10^{-13}$ Вт. Таким образом, при угле расходимости излучения маяка $3'$ отношение мощности полезного сигнала к мощности шума соответствует $(0,16 \times 10^{-11} \text{ Вт}) / (1,3 \times 10^{-13} \text{ Вт}) = 12,5$.

Таким образом, при использовании излучателя маяка с мощностью излучения 1 Вт и объектива в ТС с апертурой диаметром 90 мм можно осуществить наведение на удаленный терминал, находящийся на расстоянии 40 000 км.

ВАРИАНТЫ КОМПОНОВКИ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ТРАКТА КОСМИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

Авторами проведен анализ схемных решений исполнения терминалов КОЛС с отдельными приемным и передающим каналами для получения минимальных габаритов при сохранении функциональных характеристик.

Также был проведен оценочный расчет габаритных размеров терминала: рассматривались варианты размещения функциональных узлов КОЛС на борту КА, основываясь

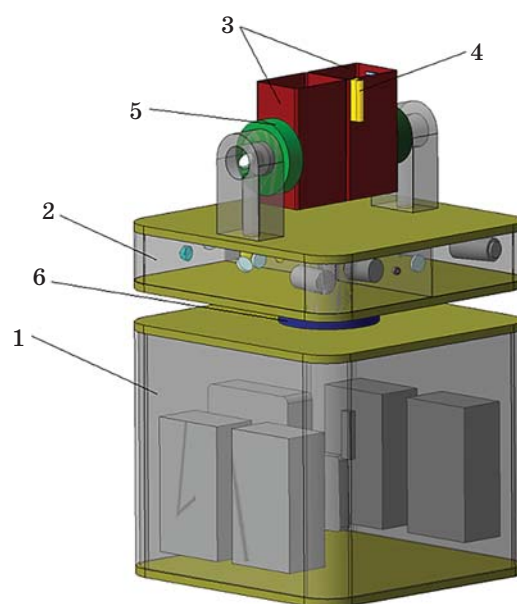


Рис. 5. Вид терминала КОЛС с расположением основных элементов. 1 — блок управления, содержащий трансивер, усилители, блоки питания лазеров и диодов, блоки питания-управления дефлекторами, 2 — блок с оптическими модулями передатчика и приемника, 3 — две ТС, 4 — излучатель маяка, 5, 6 — двигатели ОПУ

Fig. 5. View of the space optical communication line terminal with the location of the main elements. (1) Control unit containing transceiver, amplifiers, power supplies for lasers and diodes, power supplies for deflector controls, (2) unit with optical modules for transmitter and receiver, (3) telescopic systems, (4) beacon emitter, (5), (6) are support slewing device engines

на размерах коммерческих образцов комплектующих (трансивер, волоконный усилитель, предусилитель и др.). Пример размещения элементов ОМТ по результатам оценок приведен на рис. 5.

Проведенные оценки показали, что габаритные размеры терминала с учетом размещения функциональных узлов остаются небольшими ($350 \times 350 \times 600$ мм), что должно позволить разместить данный терминал на космическом носителе.

В заключение следует отметить, что для окончательного выбора варианта исполнения ОМТ КОЛС необходимо проведение макетирования основных узлов и сравнительный анализ, при которых будут оценены энергетические и массогабаритные характеристики системы для заданных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были разработаны два варианта оптических схем терминалов для проведения космической оптической связи в режиме полного дуплекса на расстояниях до 4000 и до 40 000 км. В качестве узлов, обеспечивающих проведение связи, выбраны широко используемые в волоконной оптической связи трансиверы и оптические усилители. Выполнено числен-

ное моделирование при использовании формулы, связывающей заданную погрешность наведения излучения на терминалы КОЛС и минимально допустимую мощность излучения передатчиков КОЛС в зависимости от пороговой чувствительности приемного канала, диаметра апертуры ТС и расстояния между терминалами КОЛС. Проведенные оценки погрешности наведения и сопровождения показывают возможность осуществления сеанса связи. Путем конкретных расчетов показано, что выбранные трансивер и оптические усилители обеспечивают оптическую связь на расстояниях до 4000 и до 40 000 км. Также рассчитаны требуемые для этого диаметры объективов ТС. Рассчитаны конкретные значения требуемых мощностей излучения передатчиков при различных углах, определяющих допустимую погрешность наведения. Рассчитаны требуемые мощности излучения маяков, обеспечивающих наведение ТС терминалов друг на друга. На основе оптической схемы с раздельными приемным и передающим каналами предложен трехмерный макет терминала КОЛС. Совокупность предложенных решений позволяет осуществлять лазерную связь между двумя терминалами, расположенными на расстояниях до 40 000 км, при передаче и приеме информации со скоростью до 11 Гбит/с.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Казанцев С.Г. Лазерные технологии для телекоммуникационной платформы малого космического аппарата // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИ-ЭМ. 2018. Т. 163. № 2. С. 29–47.
Kazantsev S.G. Laser technologies for telecommunication platform of small spacecraft [in Russian] // Problems of Electromechanics. Proc. VNIIEМ. 2018. V. 163. № 2. P. 29–47.
2. Tolker-Nielsen T., Guillen J-C. The first European optical communication terminal in orbit // ESA Bulletin. 1998. № 96. P. 1–3.
3. Keizo N., Yamamoto A. Preliminary design of laser utilizing communications equipment (LUCE) installed on optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS) // Photonics. 1995. V. 2381. P. 14–26. <https://doi.org/10.1117/12.207415>
4. Carrizo C., Knappek M., Horwath J., et al. Optical inter-satellite link terminals for next generation satellite constellations // Proc. Soc. Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2020. V. 11272. Art. id. 1127203. P. 1–11. <https://doi.org/10.1117/12.2545629>
5. Широбакин С.Е., Крюкова И.В., Чуковский Н.Н. и др. Новая концепция построения бортовой аппаратуры межспутниковых оптических линий связи // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 2. С. 122–127.
Shirobakin S.Ye., Kriukova I.V., Chukovskii N.N., et al. A new concept for the construction of on-board equipment for inter-satellite optical communication lines [in Russian] // Herald of Bauman MSTU. Instrument Engineering Ser. 2008. № 2. P. 122–127.
6. Гавриленко С.В., Феоктистов Н.Н., Хегай Д.К. Особенности современного этапа развития оптических линий межспутниковой связи // Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 3. С. 54–60.
Gavrilenko S.V., Feoktistov N.N., Khagai D.K. Features of the current stage of development of optical inter-satellite communication lines [in Russian] // Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg. Proc. IHEs. Instrument Engineering. 2008. V. 51. № 3. P. 54–60.
7. Никулин В.И., Яковлев С.В. Разработка и исследование каналов системы космической лазерной связи // XLIII акад. чтения по космонавтике. 2019. Тез. докл. Т. 2. С. 115–116.
Nikulin V.I., Yakovlev S.V. Design and study of channels of space laser communication systems [in Russian] // XLIII Academic Readings on Cosmonautics. 2019. Abstract of the Conf. Report. V. 2. P. 115–116.
8. Крюкова И.В., Чуковский Н.Н. Проблемы создания аппаратуры для межспутниковых и атмосферных

- оптических линий связи // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2007. № 1. С. 9–23.
- Kriukova I.V., Chukovskii N.N. Challenges in development of hardware for inter-satellite and atmospheric optical communication lines [in Russian] // Herald of Bauman MSTU. Instrument Engineering Ser. 2007. № 1. P. 9–23.
9. Горбуленко Е.А., Меснянкин Е.П., Потапов С.Л. и др. Разработка оптико-механического тракта для дуплексной лазерной космической связи // Сб. науч. статей. XII Междунар. научно-техн. и научно-методическая конф. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023) в 4 т. / Под. ред. Макаренко С.И. СПб.: СПбГУТ, 2023. Т. 1. С. 349–354.
- Gorbulyenko Ye.A., Mesnjankin E.P., Potapov S.L., et al. Design of optical-mechanical path for duplex laser space communication [in Russian] // Collection of Research Papers. XII Intern. Scientific and Technical and Scientific and Methodical Conf. Current Problems of Infotelecommunications in Science and Education (APINO 2023) in 4 vs. // Ed. Makarenko S.I. / St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications, 2023. V. 1. P. 349–354.
10. Sanmukh Kaur, Vishakha Tyagi, Anurupa Lubana. Оптимизация производительности межспутниковой оптической беспроводной системы с использованием линейно поляризованных мод [in English] // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 10. С. 39–49. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-10-39-49>
- Sanmukh Kaur, Vishakha Tyagi, Anurupa Lubana. Performance optimization of inter-satellite optical wireless system using linearly polarized modes // J. Opt. Technol. 2021. V. 88. № 10. P. 579–586. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000579>
11. Страхов С.Ю., Трилис А.В., Сотникова Н.В. Особенности передающих телескопов для систем лазерной связи // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 5. С. 52–59. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-05-52-59>
- Strakhov S.Yu., Trilis A.V., Sotnikova N.V. Specifics of transmitting telescopes for laser communication systems // J. Opt. Technol. 2021. V. 88. № 5. P. 264–269. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000264>
12. Карцан И.Н. Концепция развития межспутниковой лазерной связи // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24. № 2. С. 247–259. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2023-24-2-247-259>
- Kartsan I.N. Development concept of inter-satellite laser communication [in Russian] // Siberian Aerospace J. 2023. V. 24. № 2. P. 247–259. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2023-24-2-247-259>
13. Boroson D.M., Bondurant R.S., Scozzafava J.J. Overview of high rate deep space laser communications options // Proc. SPIE. 2004. V. 5338. <https://doi.org/10.1117/12.543010>
14. Khatiri F.I., Boroson D.M., Murphy D.V., et al. Link analysis of Mars–Earth optical communications system // Proc. SPIE. 2004. V. 5338. <https://doi.org/10.1117/12.543009>
15. Boroson D.M., Bondurant R.S., Murphy D.V. LDORA: A novel laser communications receiver array architecture // Proc. SPIE. 2004. V. 5338. <https://doi.org/10.1117/12.543012>
16. Boroson D.M., Scozzafava J.J., Murphy D.V., et al. The lunar laser communications demonstration (LLCD) // 3rd IEEE Intern. Conf. Space Mission Challenges for Inform. Technol. 2009. <https://doi.org/10.1109/SMC-IT.2009.57>
17. Robinson B.S., Boroson D.M., Burianek D.A., et al. The lunar laser communications demonstration // Intern. Conf. Space Optical Systems and Applications. May 2011. <https://doi.org/10.1109/ICSOS.2011.5783709>
18. Оптический трансивер LS48-A3L-TC-N [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://componentltd.ru/catalog/sfp-moduli/opticheskiy-transiver-ls48-a3l-tc-n/> (дата обращения: 15.02.2023).
- Optical transceiver LS48-A3L-TC-N [Electronic resource]. Access mode: <https://componentltd.ru/catalog/sfp-moduli/opticheskiy-transiver-ls48-a3l-tc-n/> (accessed 15.02.2023).
19. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA // LIGHTWAVE Russian Edition. 2003. № 1. С. 22–28.
- Ubaidullaev R.R. EDFA-based extended FOCL [in Russian] // LIGHTWAVE Russian Edition. 2003. № 1. P. 22–28.

АВТОРЫ

Евгений Петрович Меснянкин — старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-8777-5308>; mesnjankinEP@niioep.ru

Сергей Леонтьевич Потапов — старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6735-0959>; potapovSL@niioep.ru

Нина Ивановна Потапова — кандидат технических наук, начальник отдела, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0520-2077>; potapovaNI@niioep.ru

AUTHORS

Evgenii P. Mesnjankin — Senior Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-8777-5308>; mesnjankinEP@niioep.ru

Sergei L. Potapov — Senior Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6735-0959>; potapovSL@niioep.ru

Nina I. Potapova — PhD (Engineering), Head of Department, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0520-2077>; pota-povaNI@niioep.ru