

22.Principles of operational technology cyber security. – URL: [https://www.cyber.gov.au/sites/default/files/2024-10/principles\\_of\\_operational\\_technology\\_cyber\\_security.pdf](https://www.cyber.gov.au/sites/default/files/2024-10/principles_of_operational_technology_cyber_security.pdf) (дата обращения 03.10.2024).

---

**Лещенко В.В., Пантелеймонов И.Н.**

### **Средства систем лазерной космической связи**

**Аннотация:** Рассмотрены средства системы лазерной космической связи (ЛКС). Изложены примеры уровня техники средств такой связи за рубежом и в России. Определены ожидаемые в ближайшем будущем достижения в создании систем ЛКС на примере сети Starlink американской корпорации SpaceX.

**Ключевые слова:** безопасность, космическая связь, спутниковая связь, лазерная связь, средства связи, межспутниковые каналы

В настоящее время происходит стремительный взлёт темпов создания и использование глобальных систем спутниковой связи (ССС). В этом процессе особое значение приобретают многоспутниковые низкоорбитальные ССС, способные обеспечить абонентов высокоскоростной связью с низкой задержкой, использующие лазерную связь, которая обеспечивает защиту передаваемой информации от несанкционированного доступа к ней и предотвращения внесения в нее помех или недостоверной информации.

Современный технический уровень средств нисходящей высокоскоростной лазерной связи в США и Японии, оцениваемый ими как самый передовой в мире, иллюстрирует рисунок 1, на котором представлен терминал TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD) [1].

На рисунке 2 представлена иллюстрация нисходящей линии лазерной связи со скоростью 200 гигабит в секунду [2].

24 мая 2022 г. CubeSat продемонстрировал самую быструю лазерную связь НАСА из космоса. Миссия НАСА Pathfinder

Technology Demonstrator 3 (PTD-3) с системой передачи TeraByte InfraRed (TBIRD) была выполнена в рамках совместного запуска SpaceX Transporter-5. При скорости 200 гигабит в секунду (Гбит/с) TBIRD передала данные с самой высокой оптической скоростью, когда-либо достигнутой НАСА.

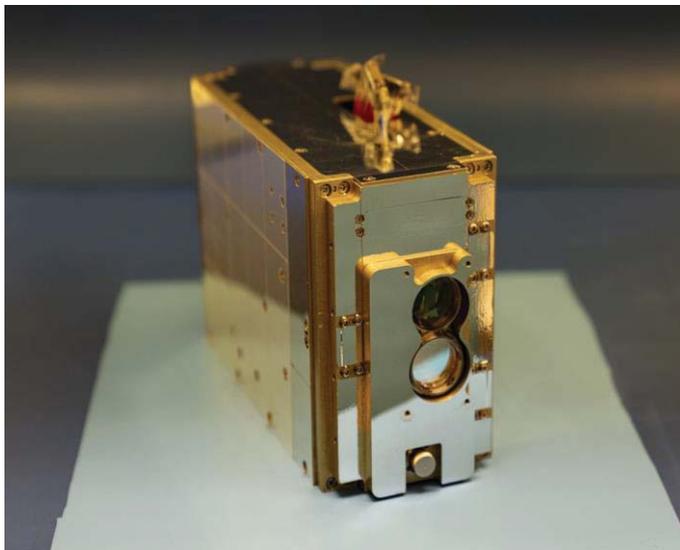


Рисунок 1 – Система TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD)

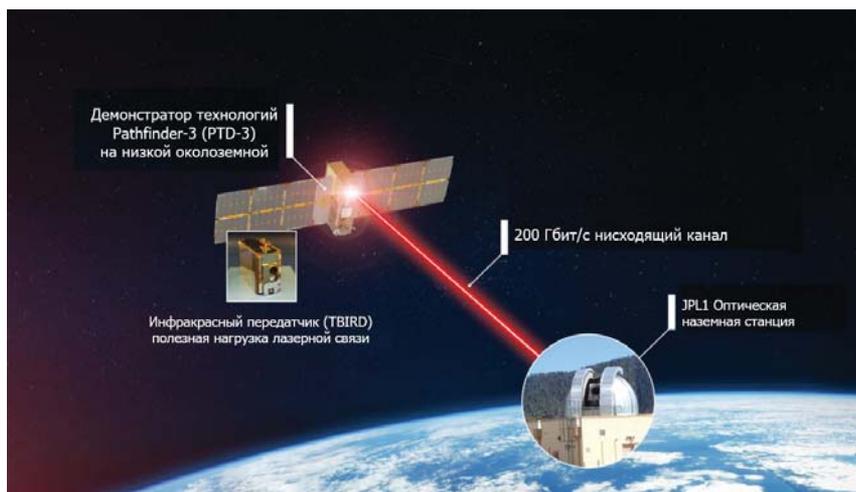


Рисунок 2 – Нисходящая космическая связь с полезной нагрузкой NASA TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD)

В основу представленной системы TBIRD положена система, на которую получен патент США № US 10826609 [3] на изобретение «Система оптического управления на основе жидких линз для лазерной связи в свободном пространстве», титульный лист патента США которого представлен на рисунке 3.

(12) <b>United States Patent</b> <b>Cahoy et al.</b>	(10) <b>Patent No.: US 10,826,609 B2</b> (45) <b>Date of Patent: Nov. 3, 2020</b>
(54) <b>LIQUID-LENS BASED OPTICAL STEERING SYSTEM FOR FREE-SPACE LASER COMMUNICATION</b>	(58) <b>Field of Classification Search</b> CPC ..... H04B 10/118 See application file for complete search history.
(71) Applicant: <b>Massachusetts Institute of Technology</b> , Cambridge, MA (US)	(56) <b>References Cited</b> <b>U.S. PATENT DOCUMENTS</b>
(72) Inventors: <b>Kerri Cahoy</b> , Lexington, MA (US); <b>Christian Haughwout</b> , Clinton, CT (US); <b>James Clark</b> , Cambridge, MA (US); <b>Paula do Vale Pereira</b> , Arlington, MA (US)	4,755,818 A 7/1988 Conrad 7,324,287 B1 1/2008 Gollier (Continued)
(73) Assignee: <b>Massachusetts Institute of Technology</b> , Cambridge, MA (US)	<b>OTHER PUBLICATIONS</b>
(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 0 days.	"Wide-angle Nonmechanical Beam Steering Using Liquid Lenses", Zohrabi et al., Optics Express, vol. 24, No. 21, pp. 23798-23809, Oct. 17, 2016 (Year: 2016).*
(21) Appl. No.: <b>16/447,648</b>	(Continued)
(22) Filed: <b>Jun. 20, 2019</b>	<i>Primary Examiner</i> — Daniel G Dobson (74) <i>Attorney, Agent, or Firm</i> — Smith Baluch LLP
(65) <b>Prior Publication Data</b> US 2020/0007232 A1 Jan. 2, 2020	(57) <b>ABSTRACT</b>
<b>Related U.S. Application Data</b>	A beam steering system for a free-space laser communication system in a satellite includes a laser that emits a laser beam, a liquid lens assembly with at least one liquid lens to change the direction of the laser beam, and an amplifying optic to amplify the change in direction of the laser beam. The beam steering system may be used to steer a laser beam transmitted to another satellite or received from another satellite. In one example, a satellite may include two beam steering systems, disposed at opposing ends of a frame, where each steering system is configured to cover a hemisphere such that together, the steering systems can transmit and/or receive a laser beam over a 4π steradian sphere. The beam steering system may include a transmit feedback system and a reception system to monitor the direction and signal of the transmitted beam and the received beam, respectively.
(60) Provisional application No. 62/687,604, filed on Jun. 20, 2018.	<b>16 Claims, 31 Drawing Sheets</b> <b>(4 of 31 Drawing Sheet(s) Filed in Color)</b>
(51) <b>Int. Cl.</b> <b>H04B 10/00</b> (2013.01) <b>H04B 10/118</b> (2013.01) (Continued)	
(52) <b>U.S. Cl.</b> CPC ..... <b>H04B 10/118</b> (2013.01); <b>B64G 1/1007</b> (2013.01); <b>B64G 1/222</b> (2013.01); (Continued)	

Рисунок 3 – Титульный лист патента США № US 10826609

Система управления лучом для системы лазерной связи в свободном пространстве на спутнике включает в себя лазер, который излучает лазерный луч, узел жидкостной линзы, по крайней мере, с одной жидкостной линзой для изменения направления лазерного луча, и усиливающую оптику для усиления изменение направления лазерного луча. Система управления лучом может использоваться для управления лазерным лучом, передаваемым на другой спутник или принимаемым с другого спутника. В одном из вариантов спутник может включать в себя две системы управления лучом, расположенные на противоположных

концах рамы. Причем каждая система управления сконфигурирована для охвата полусферы так, что вместе системы управления могут передавать и/или принимать лазерный луч на расстоянии  $4\pi$ , стерадианная сфера.

В России одним из ведущих разработчиков космической лазерной связи является Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП»), которое разработало терминал для проведения космических экспериментов по лазерной связи на трассе Борт-Земля для МКС, представленный на рисунке 4 [4].



Рисунок 4 – Терминал для проведения космических экспериментов по лазерной связи на трассе Борт-Земля для МКС

Технические данные терминала АО «НПК «СПП»: длина трассы – до 2000 км; масса терминала с транспортной рамой – 80 кг; энергопотребление – 150 Вт; скорость передачи данных – до 600 Мбит/с; длина волны передатчика – 1550 нм; длина волны маяка – 810 нм; диаграмма передатчика – 50 угл. сек; точность наведения – 10 угл. сек.

Эксперименты с российским терминалом на МКС были проведены в 2013 г.

Оптический терминал множественного доступа в открытом (космическом) пространстве на спутнике обеспечивает создание сети связанных спутников. Сеть спутников может обеспечить более широкий и непрерывный охват всей поверхности Земли.

Это позволяет улучшить навигационные услуги (например, глобальную систему позиционирования), телекоммуникационные услуги (например, Интернет, сотовую сеть) и более точное наблюдение за Землей (например, картографирование атмосферных условий Земли).

В качестве стандартизации систем лазерной космической связи в настоящее время используют публикации Консультативного комитета по космосу Системы данных (CCSDS), например, стандарты:

- кодирование и синхронизация оптических коммуникаций [5];
- физический уровень оптической связи [6];
- экспериментальные характеристики для оптической связи с высокой скоростью передачи данных – 1550 нм [7].

В Консультативном комитете по системам космических данных (CCSDS) в Службе космической связи (SLS) создана Рабочая группа области оптической связи (OPT), которая стандартизирует следующее:

- системы оптической связи с высокой фотонной эффективностью (HPE);
- системы оптической связи низкой сложности (LC);
- системы оптической связи с высокой скоростью передачи данных (HDR);
- характеристика атмосферы для оптических систем связи;
- операции оптической линии связи на основе характеристик атмосферы и прогнозирования.

В ФГБУ НИИР начаты работы по данной тематике и получены первые результаты, защищенные в последние два года пятью отечественными патентами на изобретения [8-12]. Основным объектом научно-исследовательских работ являются:

- способы и система защиты информации при организации информационного обмена с космическими аппаратами [8];
- способы маршрутизации потоков информации, критичной к задержкам в полносвязанной сети спутниковой связи на негеостационарных космических аппаратах, расположенных на однородных круговых орбитах [9];
- способы маршрутизации потоков информации критичной к задержкам в сети спутниковой связи на негеостационарных космических аппаратах, связанных межспутниковыми линиями связи в одной орбитальной плоскости и расположенных на круговых орбитах [10];
- системы высокоскоростной связи с космическими аппаратами с применением технологий автоматического взаимного наведения остронаправленных антенн [11];
- способы выбора космическим аппаратом земной станции для установления высокоскоростной связи на остронаправленных антенных системах в диапазонах, радиопрозрачность которых зависит от состояния атмосферы [12];
- протоколы передачи информации по каналам межспутниковой космической спутниковой связи, а также способы и система защиты информации при организации информационного обмена с космическими аппаратами и наземными (земными) станциями.

Лидером в процессе расширения техносферы лазерной космической спутниковой связи является сеть космической связи Starlink.

Спутники Starlink используют современное коммуникационное оборудование для предоставления пользователям высокоскоростного Интернета с малой задержкой по всему миру [13]. Каждый спутник имеет одну солнечную батарею, криптоновый ионный двигатель, навигационную систему слежения за звездами, четыре мощные антенны с фазированной решеткой для нисходящих и восходящих лучей и две параболические антенны для межспутниковых связей.

SpaceX планирует построить новый завод по производству оборудования Starlink для производства до 120 спутников в месяц.

В антеннах Starlink используется четырехъядерный процессор, оснащенный ядрами Arm Cortex A53, которые часто встречаются в смартфонах начального уровня. Процессор отвечает за управление двигателями тарелки, антеннами, обогревателями и другими компонентами.

Космические аппараты Starlink претерпели несколько версий с момента их первого запуска в 2019 году. Первая версия, получившая название v0.9, имела массу 227 кг и одну солнечную батарею. У них также не было межспутниковой связи и систем предотвращения столкновений. Всего было запущено 60 таких спутников.

Вторая версия, получившая обозначение v1.0, имела массу 260 кг и доработанную солнечную батарею. В ней также были улучшенные антенны, двигатели, системы терморегулирования и системы предотвращения столкновений. Однако межспутниковой связи у них не было. В период с 2019 по 2022 год было запущено более 1000 таких спутников.

Третья версия, получившая обозначение v1.5 или Starshield, имела массу 280 кг и включала в себя межспутниковую связь с помощью лазерной связи. В ней было стелс-покрытие, чтобы уменьшить отражательную способность и видимость для астрономов. Эти космические аппараты были разработаны для военных или правительственных целей. Около 200 таких спутников было запущено в конце 2022 – начале 2023 года.

Четвертая версия, получившая обозначение v2.0 или Super Heavy Starlink (SHS), была запущена в марте 2023 года. Её спутники имеют массу около 400 кг. Они обеспечивают более высокую пропускную способность, меньшую задержку, повышенную надежность и больше межспутниковых каналов, чем предыдущие версии.

В настоящее время лазерная система связи между интернет-спутниками Starlink ежедневно передаёт более 42 петабайт или 42 млн гигабайт данных [14]. Спутниковая группировка Starlink по состоянию на 01.09.2024 состоит из 7 тысяч космических телекоммуникационных аппаратов с 9 тысячами лазеров на борту и позволяет передавать терабиты данных в секунду. Для

предоставления пользователям доступа в Интернет в них используют радиосвязь. Наряду с радиосвязью космические аппараты оснащены системой межспутниковой лазерной связи для снижения задержек и расширения зоны глобального покрытия. Лазеры, способные поддерживать скорость соединения в 100 Гбит/с на канал, необходимы при отсутствии поблизости наземной станции SpaceX. Например, над океаном или Антарктикой, или Арктикой, спутник передаёт данные не на Землю, а на другой аппарат на орбите, образуя ячеистую сеть в околоземном космосе. Таким образом, компания добилась уровня работоспособности лазерной линии связи более 99%. В ряде случаев каналы могут поддерживать неделями скорость передачи данных до 200 Гбит/с.

Владельцем сети Starlink является американская корпорация SpaceX, которая планирует расширение своей сети спутниковой связи до 42 тысяч космических аппаратов.

Это и является ближайшим будущим направления развития систем космической связи с повышенной защищённостью передачи информации, которого должны добиться отечественные разработчики систем лазерной космической связи для необходимого уровня стратегической безопасности нашей страны.

#### Литература:

1. TERABYTE INFRARED DELIVERY. – URL: [https://https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/10/tbird\\_fact\\_sheet\\_v2.pdf?emrc=e8317f](https://https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/10/tbird_fact_sheet_v2.pdf?emrc=e8317f) (дата обращения 29.10.2024).
2. CubeSat Set to Demonstrate NASA's Fastest Laser Link from Space. – URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/cubesat-set-to-demonstrate-nasas-fastest-laser-link-from-space> (дата обращения 21.09.2024).
3. Патент США № US 10826609 Liquid-lens based optical steering system for free-space laser communication. Jun. 20, 2019.
4. Терминал для проведения космических экспериментов по лазерной связи на трассе Борт-Земля для МКС. – URL: <https://nkp-spp.ru/activity/mezhsputnikovye-lazernye-sistemy-peredachi-informatsii/> (дата обращения 10.10.2024).
5. Optical communications coding and synchronization-142x0b1. CCSDS 142.0-B-1. August 2019. – 66 p.

6. Optical communications physical layer-141x0b1. CCSDS 141.0-B-1. August 2019. – 29 p.

7. Optical high data rate (HDR) communication-1550 nm-141x10. June 2022. – 56 p.

8. Способ маршрутизации потоков информации, критичной к задержкам в полносвязанной сети спутниковой связи на негеостационарных космических аппаратах, расположенных на однородных круговых орбитах: патент на изобретение № 2787215 Российская Федерация. Заявка № 2000131736/09 от 13.04.2022: Опубликовано 30.12.2022 / Пантелеймонов И.Н. Бюл. №. 13.

9. Способ и система защиты информации при организации информационного обмена с космическими аппаратами: патент на изобретение № 2795117 Российская Федерация. Заявка № 2000131736/09 от 05.04.2022. Опубликовано 28.04.2023 / Пантелеймонов И.Н., Лещенко В.В. и др., Бюл. № 13.

10. Способ маршрутизации потоков информации критичной к задержкам в сети спутниковой связи на негеостационарных космических аппаратах, связанных межспутниковыми линиями связи в одной орбитальной плоскости и расположенных на круговых орбитах: патент на изобретение № 2799503 Российская Федерация. Заявка № 2022113285 от 18.05.2022. Опубликовано 05.07.2023 / Пантелеймонов И.Н., Бюл. № 19.

11. Система высокоскоростной связи с космическими аппаратами с применением технологий автоматического взаимного наведения остронаправленных антенн: патент на изобретение № 2816351 Российская Федерация. Заявка № 2023103693 от 17.02.2023. Опубликовано 28.03.2024 / Иванов О.А., Пантелеймонов И.Н. и др., Бюл. № 10.

12. Способ выбора космическим аппаратом земной станции для установления высокоскоростной связи на остронаправленных антенных системах в диапазонах, радиопрозрачность которых зависит от состояния атмосферы: патент на изобретение № 282689 Российская Федерация. Заявка № 20233130116 от 20.11.2024 / Пантелеймонов И.Н., Лещенко В.В. и др. Бюл. № 20.

13. *Henri van Maarseveen*. Starlink: The Quest for Global Connectivity. – Independently published, 2023. – 60 p.

14. Лазерная система связи SpaceX Starlink передаёт 42 млн гигабайт данных в день. – URL: <https://3dnews.ru/1099700/lazernaya->

**Куклев Е.А., Мельник Д.М.**

**Интеллектуальная поддержка принятий решений при управлении безопасностью полетов поставщиков услуг гражданской авиации на основе сценарного моделирования редких событий**

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы применения технологий искусственного интеллекта при управлении безопасностью полетов в гражданской авиации РФ. Предлагается принять к сведению импортозамещающую разработку «Код управления безопасностью полетов», проходящую в настоящее время экспертизу в Техническом комитете по стандартизации ТК323 «Авиационная техника», в рамках работ по национальной стандартизации.

**Ключевые слова:** моделирование, поставщики услуг, интегральный уровень риска, редкие события, уравнение катастрофы

**Введение**

В настоящее время некоторые методы по обеспечению безопасности полетов, разработанные за рубежом закрыты для авиационной деятельности в Российской Федерации, а такие методы исследования проблем безопасности полетов воздушных судов, как «Монте-Карло» или «Марковский процесс» и даже «Метод Байеса» практически непригодны при анализе свойств «редких событий», какими являются «рисковые» события в высоконадежных системах типа катастроф, аварий и серьезных авиационных инцидентов.

В этой связи предлагается создание единой формы или шаблона для конструирования типовой системы управления безопасностью полетов (СУБП) на основе риск-ориентированного подхода, в том числе и при использовании сценарного моделирования редких событий [1].