



ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А. Д. Аничкин, В. Л. Оленев

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье охватываются технические основы лазерных систем связи. Рассмотрены принципы применения лазерных систем в действующих космических программах ведущих агентств SpaceX, NASA и ESA для высокоскоростной передачи данных. Основной вывод статьи заключается в том, что лазерные системы связи имеют огромный потенциал для развития методов космической передачи данных и играют ключевую роль в успехе будущих космических программ и миссий.

Ключевые слова: лазерная связь, лазерная система передачи данных, космическая передача данных, межспутниковая связь, спутниковые сети.

Для цитирования:

Аничкин, А. Д. Применение лазерных систем связи для передачи данных в космическом пространстве / А. Д. Аничкин, В. Л. Оленев // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 3(41). – с. 17-24. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-3-17-24.

APPLICATION OF LASER COMMUNICATION SYSTEMS FOR DATA TRANSMISSION IN OUTER SPACE

A. D. Anichkin, V. L. Olenev

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article covers the technical foundations of laser communication systems. It examines the principles of applying laser systems in the current space programs of leading agencies such as SpaceX, NASA, and ESA for high-speed data transmission. The main conclusion of the article is that laser communication systems have enormous potential for the development of space data transmission methods and play a key role in the success of future space programs and missions.

Keywords: laser communication, laser data transmission system, space data transmission, inter-satellite communication, satellite networks.

For citation:

Anichkin, A. D. Application of laser communication systems for data transmission in outer space / A. D. Anichkin, V. L. Olenev // System analysis and logistics. – 2024. – № 3(41). – p. 17-24. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-3-17-24.

Введение

В эпоху космических технологий высокоскоростная связь между землей и космическими аппаратами играет ключевую роль в успехе космических миссий. Лазерная связь, благодаря своей высокой пропускной способности и способности обеспечивать скоростную передачу данных на большие расстояния, открывает новые горизонты в обмене информацией между землей и космосом.

Лазерные системы связи характеризуются меньшими энергопотреблением, требованиям по весу и объёму сопоставимо с аналогичными по скорости передачи данных, радиочастотными системами. Это критически важно для современных космических программ, где учитывается каждый грамм. Кроме того, лазерные системы обладают высокой степенью защиты от помех и перехвата, что делает их идеальными для использования в условиях космоса.

В данной статье рассматриваются основные технические подходы к применению лазерных систем связи в космической передаче данных. Особое внимание уделяется сравнению лазерных и радиочастотных систем, а также описанию перспектив дальнейшего развития лазерных технологий. В первой части статьи представлен обзор принципов работы лазерных систем связи, во второй части рассматриваются практические примеры их применения в космических программах ведущих мировых агентств, таких как SpaceX, NASA



и ESA. В третьей части проведен анализ преимуществ и недостатков лазерных систем по сравнению с традиционными радиочастотными методами.

Основная цель статьи – предоставить всестороннее понимание текущего состояния и перспектив развития лазерных систем связи в космосе, а также стимулировать дальнейшие исследования и разработки в этой области.

1. Техническое описание лазерной связи

Лазерная связь использует лазеры для передачи информации посредством световых волн. Такой подход характеризуется высокой пропускной способностью и способностью передавать данные на большие расстояния с минимальными потерями сигнала. Для лучшего представления рассмотрим компоненты системы лазерной передачи данных, в основном опираясь на концепт The VISION, [1]:

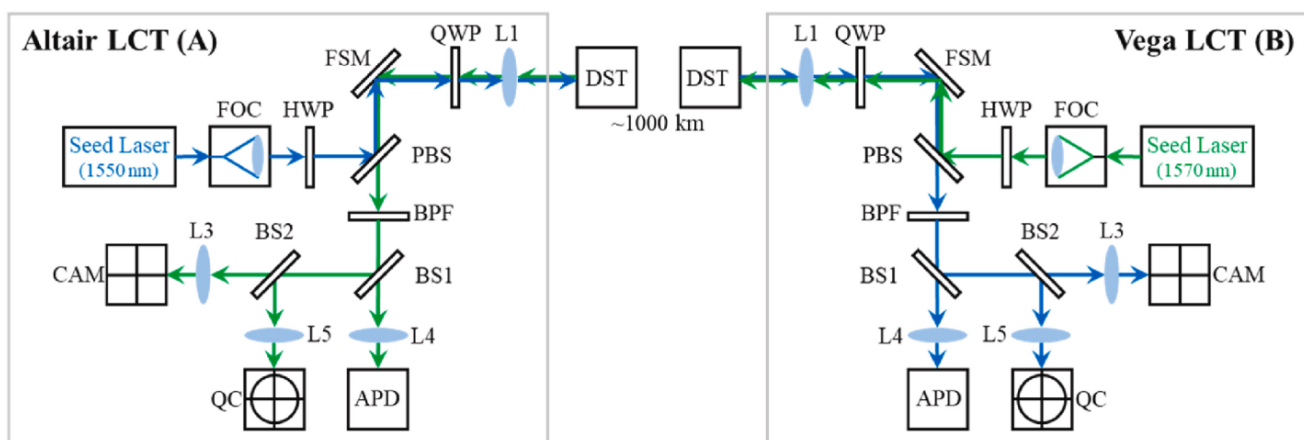
1. Лазер, как основа передачи: лазеры, используемые в системах связи, генерируют когерентный свет, что означает, что волны света находятся в фазе и имеют одинаковую частоту. Длины волн, подходящие для организации полнодуплексного лазерного соединения равны 1550 нм. с одной стороны и 1570 нм с другой, [1]. При этом для создания высокоскоростной связи порядка 1 Гбит/с на расстояниях до 1000 км мощность излучаемого сигнала после усилителя должна быть от 0,25 Вт до 1 Вт.
2. Модуляция лазерного луча: наиболее простая реализация соответствует методу ООК (On-Off Keying). Двоичная двухпозиционная манипуляция использует однополярную кодовую последовательность без возврата нуля для управления включением и выключением синусоидальной несущей. Данный метод обычно используют в условиях ограничений по объёму и потреблению питания, например, в наноспутниках. В общем случае можно использовать и другие методы модуляции лазерного сигнала.
3. Передача лазерного сигнала: после модуляции сигнала осуществляется при помощи оптических систем. Они включают в себя наборы линз, светоделителей и зеркал. Обычно данные компоненты являются частью системы наведения, захвата и слежения, которая помогает наиболее точно направить лазерный луч на приёмник дальнего конца передачи данных. Подробнее на рисунке 1.
4. Приём лазерного сигнала: для успешной демодуляции сигнала используются практически те же наборы линз, светоделителей и зеркал, которые в свою очередь фокусируют принятый лазерный луч на фотодиоды. Обычно для этого используются лавинные фотодиодные детекторы из-за их высокой чувствительности. Подробнее на рисунке 1.
5. Обработка и демодуляция полученного сигнала: после преобразования светового сигнала в электрический обычно происходит в три этапа – усиление, фильтрация помех, демодуляция.
6. Система наведения и стабилизация: обеспечением точности и надёжности лазерной связи в основном занимается система наведения, захвата и слежения. Она содержит в себе, уже упоминавшийся, набор линз и зеркал, а также аппаратно-программные средства для комплексного управления.

Разделяют три фазы установления соединения.

- Поиск – процесс выравнивания векторов спутника относительно друг друга с помощью элементов управления ориентацией в соответствии с информацией, полученной от наземной станции по радиоканалу или систем ориентации в пространстве;
- Захват – использование широкого луча с расходимостью в несколько миллирадиан для корректировки наведения лазерного луча;



- Слежение – использование узкого лазерного луча с расходимостью менее миллирадиана для поддержания установленного соединения и улучшения характеристик оптической связи. В этом состоянии возможна передача данных.



Seed Laser - источник лазера

BS* (Beam Splitter) - светоделитель

L3/4/5 (focusing Lens) - фокусирующая линза

L1 (collimating Lens) - коллимационная линза

HWP (Half Wave Plate) - полуволновая пластина

APD (Avalanche Photodiode Detector) - лавинный фотодиодный детектор

DST (Deployable Space Telescope) - раздвигаемый космический телескоп

CAM (short-wave-infrared CAMera) - коротковолновая инфракрасная камера

QWP (Quarter Wave Plate) - четвертьволновая пластина

FSM (Fast Steering Mirror) - зеркало быстрого наведения

QC (Quadrant Cell) - фотоприемник с квадрантными ячейками

FOC (Fiber Optic Coupler) - волоконно-оптический соединитель

PBS (Polarisation Beam Splitter) - поляризованный светоделитель

Рис. 1. Блок схема элементов внутренней оптики спутников Altair и Vega концепта The VISION

7. Коммуникационные протоколы: определяют методы кодирования, передачи и восстановления данных для обеспечения надёжного и эффективного обмена информацией. Они представляют собой следующее:
 - Протоколы передачи данных физического и канального уровней.
На физическом уровне определяются методы модуляции, описанные выше, в пункте 2 и кодирование информации. Методы кодирования необходимы для повышения надёжности передачи данных, в условиях низкого соотношения сигнал/шум. Используя схему коррекции ошибок Рида-Соломона, RS (255, 233), количество ошибок на бит (BER) может быть увеличен до 1×10^{-9} , в каскаде связи с BER, равным 1×10^{-3} , [1].
На канальном уровне определяются формат кадров, т.е. структуру данных, передаваемых в одном кадре, включая заголовки, полезные данные и контрольные суммы и методы синхронизации между передатчиком и приемником для правильной интерпретации данных.
 - Методы коррекции ошибок: помимо описанных ранее методов кодирования можно использовать специализированные протоколы. Например, протокол ARQ (Automatic Repeat reQuest) содержит подробное описание методов автоматического запроса на повторение, такие как Stop-and-Wait ARQ, Go-Back-N ARQ и Selective Repeat ARQ, [2]. Данные методы используются для реализации механизма повторной передачи ошибочных кадров.



2. Применение лазерных систем связи в космических программах Инициативы ESA.

Первым экспериментом с лазерной передачей данных – проект SILEX, [3, 4], в рамках которого были построены два космических лазерных терминала для спутников Artemis, терминал Opale и Spot-4, терминал Pastel, 2001 год. Затем полученные наработки были использованы для разработки космической программы Lola, [5], в рамках которой была разработана система наведения, захвата и слежения, способная установить лазерную связь между Artemis на высоте 36 000 км над Землёй и самолётом Mystère 20, оснащённым бортовым лазерным приемопередатчиком Lola (Liaison Optique Laser Aéroportée). Все терминалы обменивались данными изображений высокой чёткости со скоростью 50 Мбит/с. Проекты были разработаны в тесном сотрудничестве между Европейским космическим агентством (ESA), Французским космическим агентством (CNES) и производителем Astrium с участием более 20 европейских подрядчиков.

Инициативы НАСА.

Следующая по значимости космическая программа, нацеленная на демонстрацию возможностей лазерной связи, была Lunar Laser Communications Demonstration (LLCD). Миссия LLCD стала частью более высокой цели НАСА по повышению скорости обмена данными между Землей и космосом. Проект демонстрации был частью миссии LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer), происходившей на орбите Луны. Результатом была достигнута нисходящей скорости передачи данных до 622 Мбит/с и восходящей скорости передачи данных до 20 Мбит/с, [6]. Соединение было установлено между спутником на орбите Луны и наземной станцией на расстоянии 400 000 км в 2013 году.

Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) является крупным проектом-продолжением LLCD НАСА. В 2021 году LCRD стала первой комплексной лазерной ретрансляционной системой НАСА, демонстрирующей и тестирующей лазерные технологии, разработанные НАСА. LCRD оснащена двумя оптическими терминалами, каждый из которых способен передавать и принимать данные со скоростью 1,2 гигабит в секунду, [7]. Первые 2 года LCRD передавала данные собственных исследований НАСА и предоставляла свои возможности частным космическим программам.



Рис. 2. Полезная нагрузка НАСА ILLUMA-T.



Рис. 3. Иллюстрация демонстрации НАСА ретранслятора лазерной связи, осуществляющего связь с Международной космической станцией по лазерным каналам связи.

В декабре 2023 года модуль ILLUMA-T (интегрированный демонстрационный пользовательский модем и усилительный терминал на низкой околоземной орбите) был установлен на внешней стороне Международной Космической Станции, [8, 9]. Как результат данные с МКС, при помощи модуля ILLUMA-T передаются на LCRD, а затем на оптические наземные станции в Калифорнии или на Гавайях со скоростью 1,2 гигабита в секунду. Сам оптический модуль ILLUMA-T состоит из телескопа и двухосного подвеса, который позволяет наводить и отслеживать LCRD на геосинхронной орбите. Сам модуль и графическое изображение ретрансляции изображены на рисунках 2 и 3 соответственно.

TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD) — логическое продолжение программы LCRD, призванное расширить возможности технологий лазерной связи в космосе, [10]. Проект TBIRD, разработанный MIT Lincoln Labs, направлен на демонстрацию высокоскоростной лазерной связи для передачи терабайтов информации из космоса на Землю с использованием технологии лазерной связи. Так, находясь на низкой околоземной орбите, на высоте 483 км, модуль TBIRD в мае 2023, [11], года достиг скорости передачи данных в 200 гигабит в секунду. При этом в ходе программы за 2023 год TBIRD предоставил самый большой объем данных: 4,8 терабайт за один пятиминутный проход.

Инициатива SpaceX.

Laser Inter-Satellite Links (LISL's) – представляют собой революционную технологию в спутниковой связи, использующую методы лазерной связи для обеспечения высокоскоростной передачи данных с высокой пропускной способностью между спутниками. SpaceX интегрировала собственную реализацию LISL в группировку Starlink, чтобы обеспечить глобальную связь с высокой пропускной способностью и малой задержкой. Начиная с версии Starlink Block v1.5 спутники используют 3 лазерных приёмопередатчиков, работающих со скоростью до 200 Гбит/с, [12]. А согласно расчётам для орбиты 550 км максимальная дальность соединения будет равна 5 016 км, [13]. По состоянию на апрель 2024 года на орбите находится 5874 спутника Starlink, из которых 5 800 находятся в рабочем состоянии, [14].

3. Перспективы и будущие исследования

По заявлению НАСА ILLUMA-T последний проект демонстрации лазерной связи, который закрепит позицию использования лазерных систем как основных для



высокоскоростной передачи данных. Основные будущие направления — это использования лазерных систем передачи данных для исследования дальнего космоса и развёртывания инфраструктуры схожей с Internet в космосе (LunaNet), [15].

Отметим несколько перспективных космических программ.

Миссия CubeSat Laser Infrared CrosslinK (CLICK) — это инновационный проект, возглавляемый НАСА, Массачусетским технологическим институтом (MIT) и Университетом Флориды (UF). Проект нацелен на демонстрацию возможностей и преимуществ высокоскоростной лазерной связи, до 20 Мбит/с для межспутниковой связи между небольшими спутниками на расстояниях от 25 до 580 км, также известными как CubeSat, [16].

В рамках миссии CLCK A одноимённый спутник размеров 1,2U, начиная с октября 2022 года, продемонстрировал высокую точность зеркала быстрого наведения, позволяющую использовать маломощные лазеры в миссии CLICK В/С. Эксперимент был проведён между спутником CLICK A с высоты 400 км и 30 сантиметровым телескопом на земле. Отмечено, что основное ограничение лазерного соединения остаются погодные условия.

Миссия CLICK В/С будет запущена в июне 2024 года, [17]. Цель – демонстрация полнодуплексной оптической связи между двумя малыми космическими аппаратами (1,5U каждый) на низкой околоземной орбите на расстоянии 25-580 километров друг от друга на скоростях передачи данных более 20 Мбит/с. Миссия также продемонстрирует возможность точного определения дальности между космическими аппаратами, что обеспечивает возможность измерения расстояния и местоположения каждого из них с разрешением примерно до 0,5 метра.

DSOC будет тестировать технологии лазерной связи для решения уникальных задач, связанных с исследованием дальнего космоса. Модуль DSOC был запущен в октябре 2023 года на зонде Psyche, [18], [19], предназначенном для изучения уникального металлического астероида, вращающегося вокруг Солнца между Марсом и Юпитером. Основная цель продемонстрировать работу лазерной связи в условиях дальнего космоса, когда зонд будет находиться примерно в 1,5-2,5 астрономических единицах (220-370 миллионов км) от Земли. По оценкам NASA в январе 2025 года зонд достигнет заявленных расстояний, и миссия перейдёт к активной фазе. Этот эксперимент прежде всего направлен на изучение влияния сверх высоких расстояний на лазерную связь, которая уже неплохо изучена на околоземных дистанциях.

Orion Artemis II Optical Communications System (O2O) будет использовать лазерную связь на космическом корабле «Орион», который доставит людей на Луну впервые после миссий «Аполлон». Artemis II станет первым пилотируемым лунным полетом, который продемонстрирует технологии лазерной связи, отправляя данные на Землю со скоростью до 260 мегабит в секунду, [roadmap]. Запуск планируется в 2025 году, [15], [20].

Заключение

Развитие и внедрение лазерных систем связи в космической сфере открывает новые горизонты для передачи данных. Успешное применение таких систем в различных космических программах, включая проекты SpaceX, ESA и NASA, демонстрирует преимущества лазерных систем связи по сравнению с традиционными радиочастотными системами. Особенно это касается высокой пропускной способности, улучшенной безопасности передачи данных и сокращения задержек, что критически важно для современных миссий, таких как изучение дальнего космоса.

Несмотря на многочисленные преимущества, лазерные системы связи сталкиваются с некоторыми техническими проблемами, такими как необходимость точной системы наведения и стабилизации, влияние атмосферных условий на качество связи, а также высокая стоимость разработки и внедрения этих систем. Несмотря на это прогресс в области лазерных систем связи продолжается, и дальнейшие исследования и разработки обещают преодоление существующих ограничений.



В будущем лазерные системы связи могут стать основным средством передачи данных в космосе, обеспечивая высокую эффективность и надежность обмена информацией. Ожидается, что дальнейшие исследования в области лазерных технологий приведут к появлению новых решений и усовершенствованию существующих систем, что сделает их еще более привлекательными для использования в космических миссиях.

Таким образом, интеграция лазерных коммуникационных технологий в космические миссии не только расширяет границы возможного в исследованиях космоса, но и создает новые возможности для улучшения и оптимизации коммуникаций на Земле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geuk-Nam, Kim The VISION – Concept of laser crosslink systems using nanosatellites in formation flying / Kim Geuk-Nam, Park Sang-Young, Seong Sehyun, Lee Joohee, Choi Suyong, Kim Young-Eon, Ryu Han-Gyeol, Lee Sungmoon, Choi Jae-Young, Han Sang-Kook // Acta Astronautica – 2023. – Volume 211. – p. 877-897.
2. Modiano, ARQ Protocols: Go Back N and SRP // Communication Systems Engineering [Электронный ресурс]. – URL: https://ocw.mit.edu/courses/16-36-communication-systems-engineering-spring-2009/resources/mit16_36s09_lec18/ (дата обращения: 29.05.2024)
3. Demelenne, B, NASA. Goddard Space Flight Center, Third International Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems, Part 1, 1997, 625-631 p.
4. eoPortal, ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission Satellite) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/artemis#silx-semiconductor-intersatellite-link-experiment> (дата обращения: 29.05.2024)
5. Cazaubiel, V., Planche G., Chorvalli V., Le Hors L., Roy B., Giraud E., Vaillon L., Carré F., Decourbey E. LOLA: a 40.000 km optical link between an aircraft and a geostationary satellite // Proceedings of the 6th International Conference on Space Optics (ICSO), ESA/ESTEC, The Netherlands, June 27-30, 2006, ESA SP-621.
6. Cornwell, Donald M. NASA's Optical Communications Program for 2015 and Beyond // Technology Division, Space Communications and Navigation Program, – NASA Headquarters, US, 2015. – 6 p.
7. eoPortal, STPSat6-LCRD (Laser Communications Relay Demonstration) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/stpsat6-lcrd#background-in-optical-communications> (дата обращения: 29.05.2024)
8. NASA: Murphy, K. NASA to Demonstrate Laser Communications from Space Station [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nasa.gov/technology/nasa-to-demonstrate-laser-communications-from-space-station/> (дата обращения: 29.05.2024)
9. NASA: Schauer, K. NASA's Space Station Laser Comm Terminal Achieves First Link [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nasa.gov/technology/space-comms/nasas-space-station-laser-comm-terminal-achieves-first-link/> (дата обращения: 29.05.2024)
10. LINCOLN LABORATORY, MIT: Tantillo, A. Communications system achieves fastest laser link from space yet [Электронный ресурс]. – URL: <https://news.mit.edu/2022/communications-system-achieves-fastest-laser-link-space-yet-1130> (дата обращения: 17.05.2024)
11. TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ll.mit.edu/r-d/projects/terabyte-infrared-delivery-tbird> (дата обращения: 17.05.2024)
12. Chaudhry, A. U. Laser Inter-Satellite Links in a Starlink Constellation / A. U. Chaudhry, H. Yanikomeroğlu // Vehicular Technology Magazine. – 2021. – №16(2). – P. 48–56



13. STARLINK: Satellite technology [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.starlink.com/technology> (дата обращения: 17.05.2024)
14. E. Howell, T. Pultarova, Starlink satellites: Facts, tracking and impact on astronomy [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html> (дата обращения: 29.05.2024)
15. NASA: lasers light the way, laser communications missions [Электронный ресурс]. – URL: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2021/05/optical_comm_roadmap_508.pdf (дата обращения: 29.05.2024)
16. NASA: CubeSat Laser Infrared Crosslink [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nasa.gov/smallspacecraft/what-is-click/> (дата обращения: 29.05.2024)
17. On-Orbit Operations and Lasercom Experiment Results for the CLICK-A Mission // 2023 CubeSat Developers' Workshop [Электронный ресурс]. – URL: http://mstl.atl.calpoly.edu/~workshop/archive/2023/presentations/2023_Day1_Session1_Grenfell.pdf (дата обращения: 29.05.2024)
18. NASA: Deep Space Optical Communications (DSOC) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nasa.gov/mission/deep-space-optical-communications-dsoc/> (дата обращения: 20.05.2024)
19. The European Space Agency: Shining a light on NASA's deep space demo [Электронный ресурс]. – URL: https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Shining_a_light_on_NASA_s_deep_space_demo (дата обращения: 20.05.2024)
20. NASA: What's Next: The Future of NASA's Laser Communications [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/whats-next-the-future-of-nasas-laser-communications/> (дата обращения: 20.05.2024)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аничкин Антон Дмитриевич

Магистрант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: antonanichkin@gmail.com

Оленев Валентин Леонидович

Зав. каф. 14, канд. техн. наук, доц.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: valentin.olenev@guar.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anichkin Anton Dmitrievich

Master Student

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: antonanichkin@gmail.com

Olenev Valentin Leonidovich

HoD. 14, PhD. tech. Sciences, associate Professor

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: valentin.olenev@guar.ru