Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science, Technology & Applications (Persian)

Vol. 5, No. 1, pp.:64-99
2025

DOI:

10.22034/jssta.2025.488443.1215

Article Info

Received: 1403-08-24
Accepted: 1403-11-27

Keywords

Free Space Optics, FSO, Laser Communication Terminal, Satellite Laser communication, NASA, ESA, JAXA, Strategy, Intersatellite optical communication

How to Cite this article

J. Haghshenas, "Advances and Prospects of Free Space Optical Communication in Space Applications", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 64–99, 2025.

Original Article

Advances and Prospects of Free Space Optical Communication in Space Applications

Javad Haghshenas*

*Satellite System Institute, Iranian Space Research Center (ISRC), Tehran, Iran.
j.haghshenas@isrc.ac.ir

Abstract
This research aims to investigate the emerging technology of free-space optical communication and its applications in the space industry. By employing light beams as information carriers, this technology offers significantly higher bandwidth and enhanced security compared to conventional RF methods. The study provides a comprehensive review of the history of space missions aimed at developing and utilizing the advantages of free-space optical communication. Furthermore, it delves into the principles, challenges, and opportunities of this technology in various domains, including satellite communication, space networks, and deep space exploration. The research also explores existing technical challenges and potential solutions. Additionally, by introducing and examining relevant standards and comparing the achievements of leading countries in this field, a clear vision for the future of space laser communication is presented. The findings of this research demonstrate that free-space optical communication can play a pivotal role in developing space communication infrastructure and revolutionizing space technologies. Therefore, a precise strategy and a step-by-step roadmap are essential for achieving this technology domestically.

مقاله پژوهشی

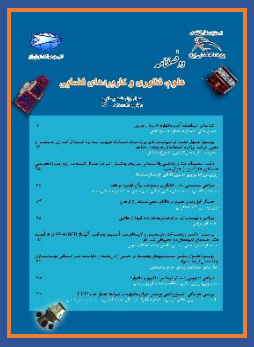
پیشرفت‌ها و چشم‌اندازهای مخابرات اپتیکی فضایی

جواد حق شناس*

پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

j.haghshenas@isrc.ac.ir

* نویسنده مسئول



دسترس‌پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی

سال پنجم، شماره ۱، صفحه ۶۴-۹۹
بهار و تابستان ۱۴۰۴

DOI:

10.22034/jssta.2025.488443.1215

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

واژه‌های کلیدی

مخابرات اپتیکی فضای آزاد، ترمینال مخابرات لیزری، ماهواره، راهبرد، مخابرات اپتیکی بین ماهواره‌ای

نحوه استناد به مقاله

جواد حق‌شناس، "پیشرفت‌ها و چشم‌اندازهای مخابرات اپتیکی فضایی"، *دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی*، جلد پنجم، شماره اول، صفحات ۹۹-۶۴، ۱۴۰۴.

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی فناوری نوظهور مخابرات اپتیکی فضایی و کاربردهای آن در صنعت فضایی انجام شده است. با استفاده از پرتوهای نور به عنوان حامل اطلاعات، این فناوری می‌تواند پهنای باند بسیار بالاتر و امنیت بسیار بیشتری نسبت به روش‌های مرسوم ارائه دهد. در پژوهش حاضر، به مرور کامل و دقیق تاریخچه ماموریت‌های فضایی با هدف توسعه و بهره‌برداری از مزایای مخابرات اپتیکی فضایی در کنار بررسی اصول، چالش‌ها و فرصت‌های این فناوری در حوزه‌های مختلفی همچون مخابرات ماهواره‌ای، شبکه‌های فضایی و اکتشافات کیهانی پرداخته شده است. همچنین، چالش‌های فنی موجود و راهکارهای مقابله با آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، با معرفی و بررسی استانداردها و مقایسه دستاوردهای کشورهای پیشرو در این حوزه، چشم‌اندازی روشن از آینده مخابرات لیزری فضایی ترسیم می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ارتباطات نوری فضایی می‌تواند نقش بسیار مهمی در توسعه زیرساخت‌های ارتباطی فضایی و ایجاد تحول در فناوری‌های فضایی ایفا کند و ضروری است یک راهبرد دقیق و نقشه راه گام به گام برای دستیابی به این فناوری در کشور تعریف شود.

۱- مقدمه

در عصر اطلاعات و ارتباطات، نیاز به انتقال حجم عظیمی از داده با سرعت بسیار بالا به طور مداوم در حال افزایش است. ماهواره‌ها به عنوان ستون فقرات زیرساخت‌های ارتباطی جهانی، نقش حیاتی در برآورده کردن این نیاز ایفا می‌کنند. با این حال، فناوری‌های مخابراتی سنتی مبتنی بر امواج رادیویی با محدودیت‌هایی همچون پهنای باند محدود، تداخل، هزینه‌های بالای تجهیزات و پیچیدگی سیستم‌های ماهواره‌ای مواجه هستند. علاوه بر این، رشد فزاینده فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و واقعیت مجازی، تقاضا برای پهنای باند را به طور تصاعدی افزایش داده و نیاز به فناوری‌های ارتباطی نوآورانه‌تر را بیش از پیش ضروری ساخته است.

مخابرات اپتیکی فضای آزاد (FSO) به عنوان یک فناوری نوظهور، پتانسیل حل بسیاری از این چالش‌ها را دارد. با استفاده از پرتوهای نور برای انتقال داده، FSO می‌تواند پهنای باند بسیار بالاتری نسبت به سیستم‌های رادیویی ارائه دهد. بر خلاف RF که محدودیت‌های طیف فرکانسی دارد، FSO از پهنای باند تقریباً نامحدودی برخوردار است. همچنین، FSO مزایای دیگری مانند امنیت بالاتر (دشوارتر بودن شنود)، کاهش تداخل، ابعاد کوچکتر تجهیزات و مصرف انرژی کمتر را ارائه می‌دهد[1]. این ویژگی‌ها FSO، را به یک گزینه جذاب برای کاربردهای مختلف از جمله ارتباطات ماهواره‌ای، شبکه‌های زمینی و ارتباطات هوایی تبدیل کرده است.

مطالعات بازار نشان می‌دهد که صنعت FSO در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است و پیش‌بینی می‌شود این رشد در سال‌های آینده نیز ادامه یابد. در حال حاضر ارزش این بازار تقریبا ۵۰۰ الی ۷۰۰ میلیون دلار است و انتظار می‌رود بازار جهانی FSO تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۴ میلیارد دلار و در ۲۰۴۰ تقریبا به ۱۰ میلیارد دلار برسد [2]. این رشد به دلیل افزایش تقاضا برای پهنای باند، کاهش هزینه‌های تجهیزات و پیشرفت‌های تکنولوژیکی در حوزه لیزر و آشکارسازها است.

با وجود تمام مزایای FSO، پیاده‌سازی این فناوری با چالش‌هایی نیز همراه است. تلاطم جوی، تداخل ناشی از نور خورشید و بارش باران، و نیاز به سیستم‌های بسیار دقیق نشانه‌روی و ردیابی از جمله مهم‌ترین چالش‌های FSO هستند. با این حال محققان و مهندسان در سراسر جهان در حال توسعه درصدد راهکارهایی برای رفع این چالش‌ها هستند.

مطالعه حاضر به بررسی جامع فناوری FSO با تمرکز بر کاربردهای ماهواره‌ای می‌پردازد. ابتدا تاریخچه توسعه این فناوری از آغاز تا اکنون مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس اصول کار و اجزای اصلی سیستم‌های FSO تشریح می‌شود. در ادامه، چالش‌های فنی موجود در پیاده‌سازی سیستم‌های FSO و راهکارهای مقابله با آن‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین استانداردها و پروتکل‌های ارتباطی مورد استفاده در این حوزه بررسی شده و دستاوردهای مهم کشورهای پیشرو در این زمینه به‌صورت جامع مقایسه می‌شود. در نهایت، با توجه به بررسی‌های انجام شده، یک نقشه راه برای توسعه فناوری FSO در ایران ارائه می‌شود.

هدف اصلی این مقاله ارائه یک دیدگاه جامع و روشن از فناوری FSO برای محققان، مهندسان، سیاست‌گذاران و علاقه‌مندان به این حوزه است. با مطالعه این مقاله، خواننده می‌تواند به درک عمیقی از پتانسیل‌ها و چالش‌های این فناوری دست یابد و نقش مهم آن را در آینده ارتباطات جهانی درک کند.

۲- تاریخچه و پیشینه

مطالعه تاریخی و روند توسعه مخابرات اپتیکی فضایی در این مقاله به چهار بخش کلی تقسیم بندی شده است:

۱- **دوره آغازین (قبل از دهه ۱۹۹۰) :**

در این بازه، اولین آزمایش‌ها و مطالعات نظری در زمینه ارتباطات لیزری فضایی انجام شد. با این حال، چالش‌های فنی و محدودیت‌های فناوری باعث شد که این فناوری در این دوره به طور گسترده مورد استفاده قرار نگیرد.

دستاوردهای کلیدی این دوره را میتوان به‌صورت کلی بدین صورت ارائه کرد:

در سال ۱۸۷۶، الکساندر گراهام بل با اختراع تلفن فوتو، اولین گام را در جهت استفاده از نور برای انتقال اطلاعات برداشت [3,4,5]. این دستگاه از نور خورشید برای انتقال سیگنال‌های صوتی استفاده می‌کرد و می‌توان آن را اولین سیستم ارتباطی بی‌سیم مبتنی بر نور دانست (شکل ۱). در سال ۱۹۶۰ با کشف اولین لیزر کارآمد در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی هیوز، مالیبو، کالیفرنیا، تحولی عظیم در علم و فناوری ایجاد شد [5, 6]. لیزر با ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود مانند تکفامی، همدوسی و شدت بالا، امکان ایجاد ارتباطات نوری با سرعت و دقت بالا را فراهم ساخت.

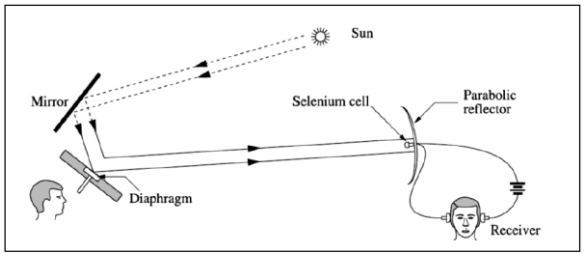
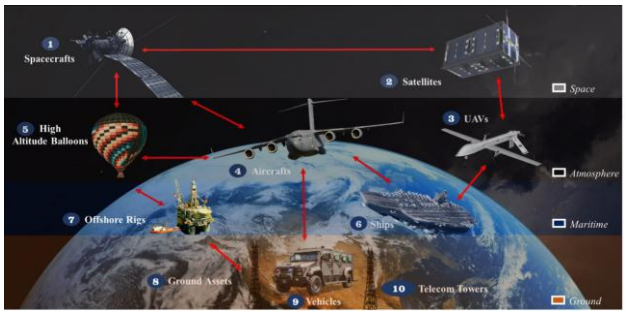


Figure 2-1: Photophone invented by Alexander Graham Bell [2]

شکل (۱): شماتیک تلفن-فوتو ابداعی الکساندر گراهام بل

در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ مطالعات نظری و آزمایش‌های اولیه بر روی ارتباطات لیزری فضایی متمرکز شد. محققان به بررسی چالش‌هایی مانند تلاطم جوی، تداخل ناشی از نور خورشید و نیاز به سیستم‌های دقیق جهت‌یابی و ردیابی پرداخته‌اند[22-7]. NASA نیز از ابتدای دهه ۶۰، تحقیقات در زمینه ارتباطات لیزری را آغاز کرد. اولین مطالعه نظری در مورد انتقال نوری از زمین به ماهواره توسط فرید در سال ۱۹۶۷ مورد مطالعه قرار گرفت [23]. چند سال بعد یک انتقال uplink، با استفاده از لیزر آرگون مبتنی بر موج پیوسته (CW) از زمین به سمت ماهواره (GEOS-II) انجام شد [24]. سپس مطالعات نظری مختلفی پیشنهاد و آزمایشات موفقیت آمیزی نیز برای بررسی ارتباطات نوری زمین به ماهواره و بین ماهواره انجام شد [31-25].

امروزه کاربردهای FSOC در ارتباطات راه دور، شبکه‌های کامپیوتری، لینک نقطه به نقطه LOS، اینترنت پرسرعت، امنیت، ارتباطات پرسرعت بین ساختمانی، پشتیبان‌گیری فیبرنوری و غیره متنوع هستند. شکل ۲ سناریوهای متنوع FSOC را نشان می دهد.



شکل (۲): سناریوهای متنوع کاربردهای ارتباطی FSOC [32].

چالش‌های اصلی در این دهه معطوف به شناسایی و مطالعه اثرات تلاطمی اتمسفر بر مشخصات پرتو لیزر در کنار مسائلی مثل چالش‌های بنیادین در نشانه‌روی و حفظ جهت‌گیری دقیق پرتو لیزر بین گیرنده و فرستنده در فواصل بسیار دور مثل محیط فضا، باعث شد مطالعات گسترده‌ای در دانشگاه‌ها برای رفع آن‌ها شکل بگیرد.

۲- دهه ۱۹۹۰ :

در اوایل سال ۱۹۹۰، در یک پروژه جذاب مشترک بین سازمان‌های NASA و ESA بنام آزمایش آینه رله (RME)، سه پرتو لیزر از زمین به ماهواره RME در ارتفاع ۳۵۰ کیلومتری ارسال و انعکاس آن از آینه‌های رله آن ماهواره مجددا بر روی زمین دریافت شد [24]. این پروژه یکی از اولین گام‌های مهم در جهت درک و کاهش تأثیرات آشفتگی جوی بر ارتباطات لیزری فضایی بود. نتایج این پروژه، محققان را به سمت توسعه سیستم‌های اپتیک تطبیقی پیشرفته‌تر سوق داد.

در سال ۱۹۹۲، پروژه GOPEX به‌عنوان یک گام جسورانه در جهت گسترش مرزهای ارتباطات لیزری فضایی انجام شد. در این پروژه با ارسال یک پالس لیزر از دو ایستگاه زمینی اپتیکی در کالیفرنیا و نیومکزیکو یک ارتباط اپتیکی با فضاپیمای گالیله در فاصله ۶ میلیون کیلومتری در اعماق فضا برقرار شد [33]. در این پروژه از یک لیزر بسیار قدرتمند، تلسکوپ‌های بزرگ برای ارسال و دریافت سیگنال، و سیستم‌های اپتیک تطبیقی پیشرفته‌تری نسبت به پروژه RME استفاده شد. موفقیت در برقراری ارتباط لیزری با یک فضاپیمای دور دست، نشان داد که این فناوری برای ارتباطات در فواصل بسیار طولانی قابل اعتماد است. از چالش‌های اساسی این پروژه، تاخیر زمانی، تداخل نوری و مدیریت مصرف انرژی در کنار نشانه‌روی دقیق برای فواصل بسیار طولانی بود. دستاوردهای فنی این پروژه برای استفاده در پروژه های بعدی مثل GOLD و SILEX مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

در سال ۱۹۹۴، NICT با استفاده از ماهواره ژاپنی EST-VI در مدار ژئو برای اولین بار یک لینک ارتباطی فضا به زمین را پیاده‌سازی کرد [32, 34-38].

در سال ۱۹۹۵، اولین لینک ارتباطی دو طرفه زمین به فضا در پروژه GOLD با استفاده از لیزر پرتوان انجام شد [38-39]. در نهایت در پروژه CEMERLL براساس موارد توسعه یافته در پروژه GOLD، یک لینک لیزری دو جهته زمین-ماهواره با اپتیک تطبیقی برای کاهش اثر تلاطم جو پیاده‌سازی شد [40].

از اواخر دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰، سازمان‌های فضایی آلمان (DLR)، فرانسه (CNES) و ESA یک پروژه مشترک به‌نام SILEX را به صورت اختصاصی، به‌منظور ایجاد ارتباط لیزری بین ماهواره‌ای آغاز کردند. به‌همین منظور ماهواره فرانسوی SPOT-4 مجهز به ترمینال لیزری متناسب با ماهواره

ARTEMIS در سال ۱۹۹۸ با موفقیت به مدار LEO پرتاب شد تا اولین گام‌های عملیاتی از پروژه SILEX انجام شود. در ۱۹۹۹ مطابق برنامه‌ریزی باید ماهواره اروپایی ARTEMIS به‌عنوان هاب اصلی در مدار ژئو قرار می‌گرفت که با توجه به ایرادات عدم سازگاری با پرتابگر ژاپنی، نهایتا در ۲۰۰۱ با استفاده از ماهواره‌بر فرانسوی آریان-۵ به مدار مورد نظر پرتاب شد. اولین لینک بین ماهواره‌های ARTEMIS و SPOT-4 در نوامبر ۲۰۰۱، برقرار شد [41-45]. این پروژه بعدها بنیان‌گذار بزرگترین شبکه رله داده در اروپا شد و آینده ارتباطات بین ماهواره‌ای را متحول کرد.

به‌عنوان جمع‌بندی این بخش میتوان گفت دهه ۱۹۹۰ با پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری لیزر و اجرای اولین آزمایش‌های عملیاتی ارتباطات لیزری در فضا، پایه و اساس توسعه این فناوری در دهه‌های بعدی را فراهم کرد.

۳- دهه ۲۰۰۰ :

همانطور که در بخش قبل ذکر شد، در نوامبر ۲۰۰۱ اولین ارتباط پایدار بین ماهواره SPOT-4 در مدار LEO و ماهواره ARTEMIS در مدار ژئو با نرخ ۵۰ مگابیت برثانیه برقرار شد [41-46]. از سال ۲۰۰۳ به بعد، به‌عنوان یک ماموریت عملیاتی ۱۳۲۷ تلاش برای برقراری لینک لیزری بین SPOT-4 و آرتمیس انجام شد که فقط ۵۷ بار موفق نبود و در مجموع معدل ۱۰ روز و ۱۸ ساعت و ۳۰ دقیقه ارتباط موفق برقرار شد [47]. همچنین ۱۳۷ بار تلاش برای برقراری ارتباط بین ایستگاه زمینی و ماهواره آرتمیس در مدار ژئو برقرار شد که فقط ۲۵ بار ناموفق بود و در مجموع معادل ۲ روز و ۱۰ ساعت و ۳۷ دقیقه ارتباط موفق برقرار شد [47]. در همان سال، پروژه GEOLITE با هدف برقراری ارتباط لیزری بین زمین و یک ماهواره در مدارGEO آغاز شد. نتایج این پروژه به‌عنوان مبنای پروژه LCRD و دیگر پروژه های NASA قرار گرفت[48, 49].

بعدها در سال ۲۰۰۵ لینک اپتیکی دو جهته موفق بین ماهواره ژاپنی KIRARI، با نام رسمیOICETS از مدار LEO و ماهواره آرتمیس انجام شد[50]. در همین سال اولین لینک بین سکوی ارتفاع بالا (HAP) و زمین توسط DLR انجام شد [51-52] که تجارب آن در سال ۲۰۰۷ برای برقراری یک لینک اپتیکی بین دو ماهواره آلمانیTerra SAR-X و ماهواره آمریکایی NFIRE در مدار LEO مورد استفاده قرار گرفت [53-55].

در این ارتباط از ترمینال‌های لیزری شرکت آلمانی Eest T استفاده شد [56]. در همین سال اولین لینک اپتیکی دو طرفه بین هواپیماهای ارتفاع بالا و ماهواره آرتیمیس در مدار ژئو از طرف سازمان فضایی فرانسه در قالب پروژه LOLA برقرار شد [57-61].

در این دهه چندین آزمایش دیگر در آزمایشگاه‌های نظامی و هوافضا انجام شد که فناوری لینک‌های نوری زمین به ماهواره، ماهواره به ماهواره و ماهواره به زمین را تثبیت کند [62-66].

در این دهه همچنین پروژه LLCD که از دهه ۱۹۹۰ شروع شده و هدف اصلی آن برقراری ارتباط لیزری بین زمین و ماه، در حال انجام بود. در نهایت در سال ۲۰۱۳ این پروژه با قرارگیری یک ماهواره در مدار ماه با موفقیت انجام شد [67-69].

به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان گفت در این دهه، نقاط عطف فراوان و مهمی در پیشرفت شتابان ارتباطات لیزری فضایی وجود داشت و با افزایش تعداد آزمایش‌ها و ماموریت‌ها، مجموعه‌ای از اولین‌ها اتفاق افتاد؛ از اولین ارتباط بین ماهواره‌ای GEO-LEO تا اولین ارتباط پایدار ماهواره مدار LEO به زمین و اولین ارتباط دوجهته LEO-LEO. این دهه را همچنین میتوان دهه توسعه فناوری‌های جدیدی مثل اپتیک تطبیقی نامید.

۴- دهه ۲۰۱۰ به بعد :

در سال ۲۰۱۱ اولین تلاش موفق چین برای برقرای لینک اپتیکی با نرخ 504 Mbps توسط ماهواره HY-2 به زمین انجام شد [70, 71]. در همین سال روسیه نیز یک ترمینال لیزری BTSL را در ایستگاه فضایی مستقر و شروع به برقراری ارتباط با ایستگاه زمینی کرد [72]. اولین لینک deep space به زمین با استفاده از کاوشگر LADEE در مدار دور ماه در سال ۲۰۱۳ برقرار شد [73-78]. در اواخر همین سال ماهواره Alphasat به مدار ژئو تزریق شد که حامل یک ترمینال مخابرات اپتیکی از شرکت TESAT بود [79-80]. اولین لینک پرسرعت (بیش از گیگابیت بر ثانیه) GEO-LEO بین ماهواره‌های اروپایی Alphasat و Sentinel 1A در سال ۲۰۱۴ انجام شد [81,82].

سال ۲۰۱۴ اولین آزمایش لیزر LEO به زمین با QKD در میکروماهواره (SOTA) توسط NICT [83, 84] و سال ۲۰۱۵ اولین لینک بین بالن‌ها توسط گوگل [85-87] انجام شد. در همین سال NASA محموله OPALS را به‌منظور انجام آزمون‌های تخصصی بر روی ISS مستقر کرد [88, 89]. اولین آزمایش‌های زمینی برای سناریوهای معادل ژئو با هدف دستیابی به نرخ‌های چند ترابیت بر ثانیه توسط DLR در سال‌های ۲۰۱۶ الی ۲۰۱۸ با موفقیت انجام شد [90]. در اواخر همین سال اولین آزمایش درهم تنیدگی کوانتومی از فضا توسط چین با استفاده از ماهوارهMicius LEO انجام داد [91, 92]. در نهایت اولین ماهواره

از منظومه سیستم رله داده اروپا (EDRS) با نام EDRS-A در اواخر ۲۰۱۶ در مدار ژئو قرار گرفت [93-97]. از طرف دیگر DLR نیز اولین پرتاب از سری پرتاب‌های OSIRIS را در همین سال آغاز کرد [98, 99]. ژاپن در سال ۲۰۱۷ پروژه منظومه ماهواره‌ایQZSS را با هدف دستیابی به لینک پایدار مخابرات لیزری با نرخ 1 Gbps را آغاز کرد [100, 101]. در همین سال DLR ماهواره Flying Laptop، از سری ماهواره‌های OSIRIS را پرتاب کرد [104 -102] و چین نیز اولین آزمایش لینک ارتباط لیزری از GEO به زمین را با نرخ 5 Gbps انجام داد [70, 105]. در سال ۲۰۱۹، ژاپن پروژه SOLISS را با توسعه تجهیزات ترمینال لیزری بسیار کوچک بر روی ISS آغاز کرد [108-106]. همچنین ESA دومین ماهواره منظومه EDRS با نام EDRS-C را در مدار قرار داد [93, 95]. از طرف دیگر چین در پروژه Shijian-20 نرخ ارسال 10 Gbps بین مدار ژئو و زمین را عملیاتی کرد [70, 105]. در این سال یکی دیگر از ماموریت‌های بلندپروازنه NASA، یعنی نمایش رله ارتباطی لیزری (LCRD) برنامه‌ریزی شده بود که نهایتا در سال ۲۰۲۱ با برقراری نرخ 1.2 Gbps از مدار GEO با موفقیت انجام شد [110-109]. سال ۲۰۲۰ چین در پروژه Tianwen-1 توانست برای اکتشافات مریخ نرخ داده مخابرات لیزری 5 Gbps را عملیاتی کند [111]. در سال ۲۰۲۱ علاوه بر انجام موفق پروژه LCRD توسط NASA، چین نیز ارتباط با نرخ 1 Gbps از ایستگاه فضایی تیانگونگ با زمین برقرار کرد [112]. همچنین DLR نیز OSIRISv4 را برای برقراری نرخ ارسال 100 Mbps به فضا پرتاب کرد [113]. سال ۲۰۲۲، NASA یک محموله مخابرات لیزری کیوبستی به‌نام TBIRD با ابعاد 3U را با هدف آزمایش فناوری ارسال داده با نرخ حدود 200 Gbps را عملیاتی کرد که میتواند چندین ترابایت داده را در بازه ۶ دقیقه، که ماهواره در دید ایستگاه زمینی قرار دارد به زمین ارسال کند. در سال ۲۰۲۳ در یک گذر ۵ دقیقه‌ای، داده‌ای با حجم ۴,۸ ترابایت معادل ۲۴۰۰ ساعت فیلم با کیفیت HD را بدون خطا به زمین ارسال کرد [117-114].

در سال ۲۰۲۳ پروژه ILLUMA-T، به‌منظور رله داده با نرخ 1.244 Gbps از ISS به ماهواره LCRD در مدار ژئو عملیاتی شد[120-118]. همچنین در سال ۲۰۲۴ NASA پروژه O2O را با هدف پشتیبانی از فضانوردان ماه‌نورد Artemis II با ارتباط با سرعت بالا از مدار ماه با ایستگاه زمینی به انجام رساند [122-121].

در حال حاضر NASA یک پروژه بلند مدت برای ایجاد Lunar relay، به‌نام LunaNet در دست انجام دارد [124, 123].

به‌عنوان جمع‌بندی این بخش میتوان گفت این دهه به تثبیت فناوری، توسعه فناوری‌های نوین، رشد سریع فناوری‌های نوین و افزایش سرعت انتقال داده در کنار کاربردهای جدیدی مانند ارتباطات کوانتومی اختصاص دارد. همچنین در اواخر دهه ۲۰۱۰ کم کم ترمینال‌های لیزری ماهواره‌ای به‌صورت تجاری تبدیل شد و در دسترس بودن آن‌ها در کنار افزایش ظرفیت تولید و رقابت باعث شد که شرکت‌هایی مثل SpaceX و OneWeb برنامه‌های ایجاد شبکه‌های گسترده با سرعت بسیار بالا برپایه ترمینال‌های لیزری را عملیاتی کنند [131-125].

۳- اصول کار و اجزای سیستم‌های ارتباطی لیزری

در سیستم‌های مخابرات لیزری ماهواره‌ای، داده‌ها به صورت سیگنال‌های نوری با استفاده از پرتو لیزر بین زمین و یک ماهواره یا بین دو ماهواره در فضا مبادله می‌شوند. این فناوری به دلیل پهنای باند بسیار بالا، کم‌اتلاف بودن و امنیت بالا، در کاربردهایی مانند مخابرات ماهواره‌ای با سرعت بالا، مخابرات بین ماهواره‌ای و ارتباطات اکتشافی، مورد توجه قرار گرفته است. در این سیستم‌ها، پرتو لیزر به عنوان حامل اطلاعات، از طریق فضای آزاد بین فرستنده و گیرنده منتقل می‌شود. این فرآیند شامل مراحل زیر است:[142-132 ,36]

تولید نور لیزر: یک لیزر با طول موج مناسب سیگنال لیزری را تولید می‌کند. این نور دارای ویژگی‌هایی مانند تکفامی، فرکانس بالا و شدت زیاد است که آن را برای مخابرات فضایی مناسب می‌سازد.

مدولاسیون: اطلاعات روی پرتو لیزر سوار می‌شود. روش‌های مختلفی برای مدولاسیون وجود دارد که از جمله آن‌ها میتوان به مدولاسیون شدت، فاز و فرکانس اشاره کرد.

انتشار پرتو: پرتو لیزر با استفاده از یک تلسکوپ به سمت گیرنده هدایت شده که در طول مسیر تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند تلاطم جوی، ابر و ذرات معلق قرار می‌گیرد.

دریافت و پردازش سیگنال: گیرنده، پرتو لیزر را دریافت و با استفاده از یک آشکارساز نوری به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. سپس این سیگنال پردازش شده و اطلاعات استخراج می‌شود.

اجزای اصلی سیستم:

اجزای اصلی یک سیستم مخابرات لیزری مخابراتی را میتوان در حالت کلی به‌صورت ذیل دسته بندی کرد:

لیزر: از لیزرهای نیمه‌رسانا، لیزرهای فیبری و لیزرهای حالت جامد می‌توان در سیستم‌های مخابرات لیزری استفاده کرد. انتخاب لیزر به عوامل مختلفی مانند پهنای باند مورد نیاز، طول موج، توان خروجی و هزینه بستگی دارد [133]

مدولاتور: وظیفه سوار کردن اطلاعات روی پرتو لیزر را بر عهده دارد. از مدولاتورهای رایج می‌توان به مدولاتورهای الکترواپتیکی و آکوستو اپتیکی اشاره کرد .[132]

تلسکوپ: تلسکوپ برای متمرکز کردن پرتو لیزر و ارسال آن به سمت ماهواره استفاده می‌شود. همچنین در دریافت پرتو لیزر از ماهواره نیز نقش دارد. تلسکوپ‌ها معمولاً از آینه‌های سهموی یا کروی ساخته می‌شوند [134,135].

آشکارساز: آشکارساز نوری پرتو لیزر دریافتی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند که در سیستم‌های نوین از AI جهت بهبود عملکرد آن استفاده می‌شود [136].

سیستم ردیابی و جهت‌یابی: این سیستم برای حفظ ارتباط بین فرستنده و گیرنده و جبران حرکت‌های نسبی آن‌ها استفاده می‌شود [142].

چالش‌ها و راهکارها:

چالش‌های اساسی یک سامانه مخابرات لیزری را میتوان به‌صورت کلی زیر دسته‌بندی کرد:

تلاطم جوی: تلاطم جوی باعث انحراف و پراکندگی پرتو لیزر می‌شود. برای مقابله با این چالش می‌توان از تکنیک‌های تصحیح جوی و استفاده از لیزرهای با توان بالا استفاده کرد [137].

افت مسیر اتمسفر: در طول مسیر انتقال، پرتو لیزر ممکن است به دلیل جذب توسط ذرات موجود در جو و یا پراکندگی دچار افت مسیر اتمسفری شود [137, 138]

نویز: نویزهای مختلف مانند نویز حرارتی، نویز شات و نویز تداخل، بر کیفیت سیگنال تأثیر می‌گذارند [133, 136, 141].

حرکت نسبی: حرکت نسبی فرستنده نسبت به گیرنده باعث می‌شود که پرتو لیزر از هدف خارج شود [141, 142].

ابرها و ذرات معلق: ابرها و ذرات باعث جذب و پراکندگی پرتو لیزر می‌شوند که برای کاهش تأثیر آن می‌توان از طول موج‌های بلندتر و استفاده از چندین پرتو لیزر استفاده کرد [138].

امنیت: امنیت یکی از مهم‌ترین چالش‌های ارتباطات لیزری است. برای افزایش امنیت میتوان از روش‌های رمزنگاری جدید، QKD و AI و لیزر با ویژگی‌های خاص استفاده کرد [139].

- مقایسه تکنولوژی RF و اپتیک

با در نظر گرفتن اجزای اصلی و پارامترهای مطرح شده در این بخش، مقایسه مشخصات و عملکرد یک سیستم مخابراتی RF و یک سیستم مخابرات اپتیکی در یک سناریوی یکسان به خواننده دید کامل‌تری از تفاوت تکنولوژیکی این دو سیستم مخابراتی خواهد داد. شکل ۳، بودجه لینک یک سیستم مخابرات اپتیکی با طول موج لیزری ۱۵۵۰ نانومتر و شکل ۴، بودجه لینک را برای دو سیستم مخابرات RF در فرکانس‌های ۳۲ و ۶۰ گیگاهرتز برای یک ماموریت یکسان GEO-LEO با فاصله تقریبی ۴۲۰۰۰ کیلومتر و نرخ ارسال 2.5 Gbps ارائه می‌کند [143]. مقایسه ابعاد آنتن‌ها و توان ارسالی موردنیاز مزیت رقابتی مخابرات اپتیکی را بیشتر آشکار می‌کند.

Optical system		
Transmit power	40.0	dBm
	10.0	W
Frequency	193	THz
Wavelength	1.55	μm
Tx antenna diameter	10.2	cm
Tx antenna gain	109.3	dB
Tx loss	-2.0	dB
Strehl ratio	-0.4	dB
Pointing loss	-3.0	dB
Beam divergence	19.3	μrad
Path loss	-290.6	dB
Rx antenna diameter	10.2	cm
Rx antenna gain	106.3	dB
Rx loss	-2.0	dB
Receive power	-42.4	dBm
Receive sensitivity	90	photons/bit
Required power	-45.4	dBm
Link margin	**3.0**	dB

شکل (۳): بودجه لینک مخابرات اپتیکی برای نرخ ارسال 2.5 Gbps برای ماموریت GEO-LEO با فاصله ۴۲۰۰۰ کیلومتر

	RF systems	
	Ka-band	Millimeter-band
Transmit power	17.0 dBW	13.0 dBW
	50.0 W	20.0 W
Frequency	32.0 GHz	60.0 GHz
Wavelength	9.4 mm	5.0 mm
Tx antenna diameter	2.2 m	1.9 m
Tx antenna gain	55.1 dBi	59.3 dBi
Feeder loss	-3.0 dB	-2.0 dB
EIRP	69.1 dBW	70.3 dBW
Pointing loss	-0.3 dB	-1.0 dB
Polarization loss	-0.5 dB	-0.5 dB
Beam divergence	0.25 deg	0.16 deg
Path loss	-215.0 dB	-220.5 dB
Rx antenna diameter	2.2 m	1.9 m
Rx antenna gain	55.1 dBi	59.3 dBi
Feeder loss	-2.1 dB	-1.5 dB
Receive power	-93.7 dBW	-93.8 dBW
System noise	29.6 dBK	29.8 dBK
G/T	23.4 dB/K	28.0 dB/K
Noise density	-199.0 dBW	-198.8 dBW
C/N_0	105.3 dBHz	105.0 dBHz
Required C/N_0	102.0 dBHz	102.0 dBHz
Link margin	**3.4** dB	**3.0** dB

شکل (۴): بودجه لینک مخابرات RF در فرکانس‌های ۳۲ و ۶۰ گیگاهرتز برای نرخ ارسال2.5 Gbps برای ماموریت GEO-LEO با فاصله ۴۲۰۰۰ کیلومتر

شکل ۵ مقایسه مخابرات اپتیکی و مخابرات مرسوم RF را برای ماموریت‌های مختلف (با فرض توان ارسالی ۱۰ و ۵۰ و ۲۰ وات مطابق جداول فوق برای لینک‌های اپتیکی و RF) ارائه می‌کند. فاصله لینک برای ماموریت‌های LEO-LEO، GEO-GEO، GEO-LEO و Moon-Satellite به‌ترتیب ۵۰۰۰، ۷۳۰۰۰، ۴۲۰۰۰ و ۴۰۰۰۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. همانطور که از این مقایسه دیده می‌شود، برای مخابرات RF ابعاد آنتن‌ها حدود ۱۳ الی ۲۲ برابر و جرم و توان مصرفی کل حدود ۲ برابر بزرگتر از مخابرات اپتیکی است [143,144].

Link scenario	Data rate	Frequency band					
		Optical		*Ka*-band		Millimeter-band	
GEO-LEO							
Antenna dia.	2.5 Gbps	10.2 cm	(1.0)	2.2 m	(21.6)	1.9 m	(18.6)
Mass		65.3 kg	(1.0)	152.8 kg	(2.3)	131.9 kg	(2.0)
Power		93.8 W	(1.0)	213.9 W	(2.3)	184.7 W	(2.0)
GEO-GEO							
Antenna dia.	2.5 Gbps	13.5 cm	(1.0)	2.1 m	(15.6)	1.8 m	(13.3)
Mass		86.4 kg	(1.0)	145.8 kg	(1.7)	125.0 kg	(1.4)
Power		124.2 W	(1.0)	204.2 W	(1.6)	175.0 W	(1.4)
LEO-LEO							
Antenna dia.	2.5 Gbps	3.6 cm	(1.0)	0.8 m	(22.2)	0.7 m	(19.4)
Mass		23.0 kg	(1.0)	55.6 kg	(2.4)	48.6 kg	(2.1)
Power		33.1 W	(1.0)	77.8 W	(2.3)	68.1 W	(2.1)
Moon-satellite							
Antenna dia.	155 Mbps	15.7 cm	(1.0)	3.5 m	(22.3)	3.2 m	(20.4)
Mass		100.5 kg	(1.0)	243.1 kg	(2.4)	222.2 kg	(2.2)
Power		144.4 W	(1.0)	340.3 W	(2.4)	311.1 W	(2.2)

شکل (۵): مقایسه مخابرات اپتیکی و مخابرات مرسوم RF را برای ماموریت‌های مختلف

۴- استانداردهای ارتباطی ترمینال‌های لیزری FSO

استانداردسازی و تعریف پروتکل‌های مشترک در حوزه مخابرات لیزری فضایی (FSO) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این استانداردها تضمین می‌کنند که تجهیزات و سیستم‌های مختلف تولید شده توسط شرکت‌های مختلف با یکدیگر سازگار است و میتوانند، در یک شبکه یکپارچه عمل کنند. در این بخش، به بررسی دقیق چندین استاندارد مهم خواهیم پرداخت و نقاط قوت و ضعف هر یک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۱- استاندارد SDA OCT

با توجه به سرعت بسیار زیاد رشد استفاده از مخابرات نوری در محیط فضا در سالیان اخیر، سازمان توسعه فضایی (SDA) که تحت هدایت وزارت دفاع ایالات متحده (پنتاگون) فعالیت می‌کند و هدف اصلی آن توسعه و پیاده‌سازی فناوری‌ها و سیستم‌های فضایی برای حمایت از نیازهای دفاعی و امنیت ملی ایالات متحده است در اوایل سال ۲۰۲۰، نسخه اولیه‌ای از یک استاندارد جامع برای ترمینال‌های مخابرات اپتیکی (OCT) معرفی کرد[145]. نسخه نهایی این استاندارد با عنوان OCT standard version 3.0.1 در اواخر ماه می ۲۰۲۳ ارائه شد[146]. در جولای ۲۰۲۴ ورژن ۴ این استاندارد نیز منتشر شده است [147].

درحال حاضر این استاندارد به‌عنوان جامع‌ترین مرجع برای طراحان و مهندسین ارتباطات اپتیکی فضایی شناخته می‌شود.در حالت کلان، این استاندارد برای ماموریت‌های فضا-به-فضا (S2S)، فضا-به-هوا (S2A)، فضا به دریا (S2M)، فضا-به زمین (S2G)، و فضای آزاد (FSO) را شامل می‌شود. هدف کلی این استاندارد سازگار شدن ماژول‌های شرکت‌های مختلف جهت استفاده مشترک در ماموریت‌ها است.

بر اساس لایه‌بندی مدل OSL این استاندارد شامل لایه بندی زیر است:

- لایه فیزیکی

به‌عنوان پایین‌ترین لایه در مدل OSI است که شامل تعریف کامل کانال‌های مخابراتی و سیستم نشانه‌روی، دریافت و ردگیری (PAT) است. استراتژی مربوط به PAT در این استاندارد دقیقا مطابق با کتاب نارنجی CCSDS با عنوان Optical High Data Rate (HDR) Communication-1064 nm تعریف شده است [148]. همچنین مشخصات اصلی پارامترهای لیزر شامل طول موج، پهنای باند و ... در کنار پارامترهای مدولاسیون (به‌عنوان مثال، On-Off Keying Non-Return-to-Zero (OOK-NRZ)،تعریف‌شبکه طیفی،Latency، پلاریزاسیون، سازگاری فرستنده و گیرنده و ... در این لایه تعریف می‌شود. همچنین این بخش شامل مشخصاتی نظیر نرخ داده موردنیاز کاربر است. علاوه بر موارد فوق، اثرات اتمسفر بر انتشار پرتو لیزر نیز در این لایه قرار می‌گیرد.

- لایه همگام‌سازی و کدینگ کانال(بخش پایینی این لایه مطابق با تعریف استاندارد CCSDS [149])

برای همگام‌سازی و کدینگ کانال در این استاندارد، رهیافت Hybrid FEC ARQ استفاده شده است که بسته به نوع و مشخصات ماموریت می‌توان FEC و ARQ را به صورت مستقل فعال یا غیرفعال کرد. جزئیات پیاده‌سازی هر کدام و الزامات مربوطه به دقت در این استاندارد تعریف و بحث شده است. مشخصات Baud rate و Code rate نیز به‌گونه‌ای تعریف شده است که نرخ دوجهته 1 Gbps پیوسته را با / بدون حضور اثرات تلاطمی اتمسفر پشتیبانی کند.

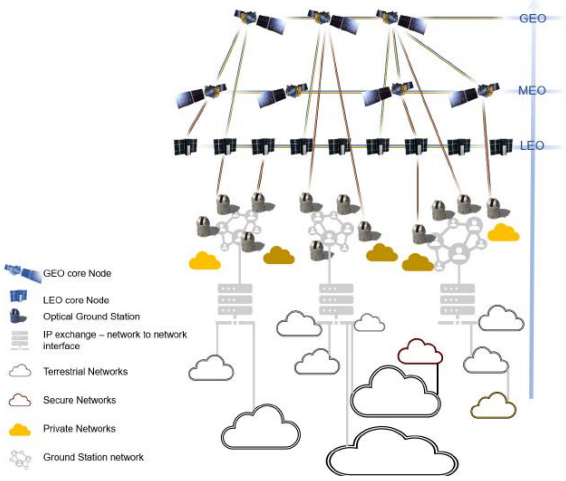
به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان گفت این استاندارد جامع‌ترین مرجع برای طراحان و مهندسین ارتباطات اپتیکی فضایی به شمار می‌رود که پوشش کاملی از سناریوهای مختلف ماموریت از جمله فضا به فضا، فضا به هوا، فضا به دریا، فضا به زمین و فضای آزاد ارائه می‌دهد. لایه فیزیکی این استاندارد به طور کامل کانال‌های مخابراتی، سیستم‌های نشانه‌روی، دریافت و ردگیری (PAT) و پارامترهای لیزر را تعریف می‌کند. لایه همگام‌سازی و کدینگ کانال نیز با استفاده از رویکرد Hybrid FEC ARQ به طور دقیق مشخص شده است [147].

درحالت کلی این استاندارد تمامی الزامات فنی، معیارهای امنیتی و ... را شامل می‌شود.

۴-۲- استاندارد ESA ESTOL

این استاندارد به عنوان یک سند توافق مشترک بین آژانس فضایی اروپا (ESA) و سایر سازمان‌ها و شرکت‌ها برای پروژه HydRON تدوین شده است [150]. این سند بر روی سازگاری ماژول‌های فضایی و زمینی تمرکز دارد و الزامات دقیقی را برای لایه فیزیکی و لایه لینک داده تعریف می‌کند. هدف اصلی این استاندارد تضمین عملکرد صحیح و یکپارچه اجزای مختلف سیستم است.

شماتیک کلی پروژه HydRON در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل (۶): شماتیک کلی پروژه HydRON [150].

این سند نیز مطابق دسته‌بندی استاندارد، در دو سطح لایه فیزیکی و لایه لینک دیتا (دقیقا مترادف با لایه همگام سازی و کدینگ کانال) به تعیین و معرفی الزامات پرداخته است.

۴-۳- استاندارد CCSDS Optical Communications

سازمان‌های فضایی بین المللی در سراسر جهان در گروه مشاوره عملیات بین سازمانی (IOAG) و کمیته مشورتی سیستم‌های داده‌های فضایی (CCSDS) برای توسعه استانداردهای مخابرات اپتیکی با یکدیگر همکاری دارند[151-149]. این استانداردها دربرگیرنده انواع سناریوهای فضایی ممکن از ارتباطات LEO به زمین گرفته تا ارتباطات بین ماهواره‌ای، رله داده، ارتباط با فضاپیماهای Deep space و غیره را شامل می‌شود.

استانداردهای CCSDS در کتب با ۹ رنگ مختلف منتشر می‌شوند که درصد اعتبار و سطوح متفاوتی دارند [151-149]. برخی قابلیت تبدیل به استانداردهای سطح ISO را دارند(مثل کتاب های آبی)، برخی در سطح توصیه هستند (کتب سرخابی)، برخی گزارش و نتایج و برخی شیوه مستندسازی (کتب زرد) و تعدادی نیز کارهای تجربی را مستند می‌کنند (کتب نارنجی). برخی نیز ممکن است پیش از انتشار رسمی تغییر کنند و ضروری است با احتیاط بیشتری مورد استفاده قرار گیرند (کتب قرمز). هر سند CCSDS باید قبل از انتشار توسط سازمان‌های عضو و آژانس‌های ناظر که تقریبا شامل تمامی آژانس‌های فضایی فعال و موسسات مربوطه می‌شود، به تصویب برسد.

کمیته مشورتی CCSDS دارای کارگروه‌های مختلفی است و سازمان‌های عضو باید قبل از انتشار هر استاندارد در مورد آن به اجماع برسند. کارگروه مخابرات اپتیکی CCSDS در سال ۲۰۱۴ و با ریاست NASA و معاونت ESA شکل گرفت و مسئول تدوین استاندارد برای طول موج، مدولاسیون، همگام‌سازی، مدیریت

داده، نشانه‌روی و رهگیری در کنار استانداردهای مربوط به شرایط جوی و اتمسفری است [148, 150]. این کارگروه تاکنون کتب زیر را منتشر کرده است:

- کتاب آبی در لایه فیزیکی مخابرات اپتیکی [152].
- کتاب آبی در کدینگ و همگام‌سازی مخابرات اپتیکی [153].
- کتاب سبز در ویژگی‌های اتمسفری برای مخابرات اپتیکی [154].
- کتاب نارنجی در زمینه ارتباطات نوری با سرعت بالای داده (HDR)- طول موج ۱۰۶۴ نانومتر (این کتاب توسط ESA و DLR بر اساس تجربه EDRS تهیه شده است) [148].
- کتاب نارنجی در مورد مخابرات اپتیکی با سرعت بالای داده (HDR)- طول موج ۱۵۵۰ نانومتر [155].

همچنین کتب CCSDS زیر در حال توسعه هستند:

- کتاب سبز در مخابرات اپتیکی [156]
- کتاب سرخابی در مورد مشخصات اتمسفری و پیش‌بینی جوی برای لینک‌های اپتیکی (این کتاب توسط CNES، JAXA، NICT و NASA در حال تدوین است) [157].
- کتاب نارنجی دوم برای پیاده‌سازی سیستم‌های مخابرات اپتیکی برای نرخ‌های بالاتر از 100 Gbps پیشنهاد می‌شود و در آن از درس‌آموخته‌ها و ویژگی‌های پروژه هایی مثل LCRD توسط NASA و JDRS توسط JAXA استفاده شده است [149].

به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان گفت سازمان مشاوره عملیات بین‌سازمانی (IOAG) و کمیته مشاوره سیستم‌های داده‌های فضایی(CCSDS) استانداردهای مختلفی را برای ارتباطات اپتیکی تدوین کرده‌اند. این استانداردها در قالب کتاب‌هایی با رنگ‌های مختلف منتشر می‌شوند و هر یک به جنبه خاصی از ارتباطات اپتیکی می‌پردازند. استانداردهای CCSDS در سطح بین‌المللی پذیرفته شده و به عنوان مرجعی معتبر در این حوزه محسوب می‌شوند.

۴-۴- مقایسه استانداردها

بمنظور جمع‌بندی، جدول ۱ مقایسه کلی استانداردهای اصلی مخابرات لیری فضایی را ارائه می‌کند.

	CCSDS	ESA ESTOL	SDA OCT
جامعیت	مجموعه ای از استانداردهای مختلف	متمرکز بر HydRON	بسیار جامع
پوشش	جنبه‌های مختلف ارتباطات اپتیکی	سازگاری ماژول‌ها	انواع سناریوهای ماموریت
سطح جزئیات	از سطح بالا تا جزئیات فنی	دقیق	بسیار دقیق
پذیرش جهانی	بسیار گسترده	خاص پروژه HydRON	گسترده

جدول (۱): مقایسه استانداردهای مختلف

نتیجه‌گیری

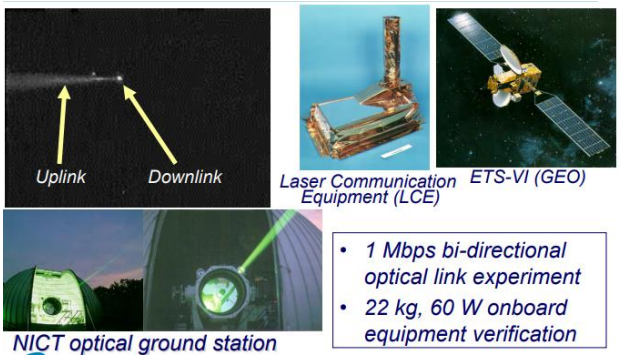
استانداردهایSDA OCT ، ESA ESTOL و CCSDS نقش مهمی در توسعه و یکپارچگی سیستم‌های ارتباطی لیزری فضایی ایفا می‌کنند. هر یک از این استانداردها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارد و انتخاب مناسب‌ترین استاندارد به عوامل مختلفی از جمله نوع ماموریت، الزامات عملکردی و بودجه بستگی دارد. با پیشرفت تکنولوژی و افزایش پیچیدگی سیستم‌هایFSO ، انتظار می‌رود که این استانداردها به طور مداوم به روزرسانی و تکمیل شوند. با توجه به جدید بودن این استانداردها، بررسی دقیق و مرور جزئیات هر کدام از استانداردهای مذکور و بازبینی بر اساس شرایط یک سازمان/کشور می‌تواند یک موضوع تحقیقاتی جذاب باشد.

۵- بررسی و مقایسه فعالیت های آژانس‌های فضایی پیشگام

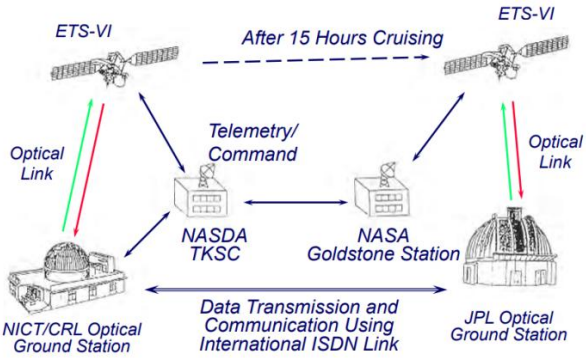
در این بخش ماموریت‌های اصلی هر کدام از آژانس‌های فضایی پیشگام با رویکرد نگاه دقیق‌تر به مشخصات ترمینال‌های لیزری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱- ماموریت های سازمان فضایی ژاپن

ژاپن تاریخچه‌ای پیشرو در توسعه فناوری مخابرات اپتیکی ماهواره‌ای دارد. ماهواره ETS-VI [158-161] اولین ماهواره در جهان بود که در سال ۱۹۹۴ با ترمینال مخابرات لیزری (LCE) از مدار GEO یک لینک فضا-زمین لیزری را عملیاتی کرد(شکل ۷و۸). در نتیجه درس‌آموخته‌های این عملیات و به‌منظور اشتراک زیرساخت‌ها، ژاپن با JPL برای استفاده از تجهیزات ایستگاه زمینی اپتیکی NASA در کالیفرنیا برای آزمایش پروژه ارتباط لیزری (GOLD) همکاری کرد [157-162].

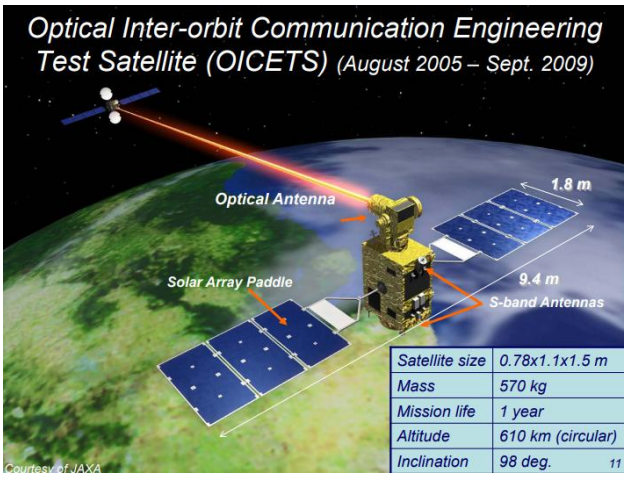


شکل (۷): ماهواره ETS-VI و محموله مخابرات لیزری LCE [162]

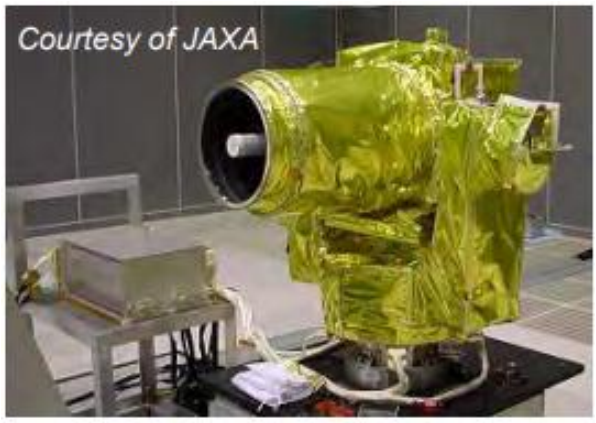


شکل (۸): شماتیک عملیاتی ماهواره ETS-VI و ایستگاه‌های زمین NASA و JAXA [161, 162]

پس از آن، در سال ۲۰۰۵ آژانس JAXA و NICT ماهواره آزمایشی لینک اپتیکی بین‌مداری (OICETS-KIRARI) را توسعه دادند که از تجهیزات ارتباط لیزری (LUCE) استفاده می‌کرد (شکل ۹و ۱۰) [50,160-166]. ماموریت KIRARI، لینک اپتیکی بین ماهواره‌ای با ماهواره آرتیمیس از ESA در GEO و همچنین لینک ارتباط مستقیم به زمین در ایستگاه‌های زمینی مختلف را نشان داد [163-166].

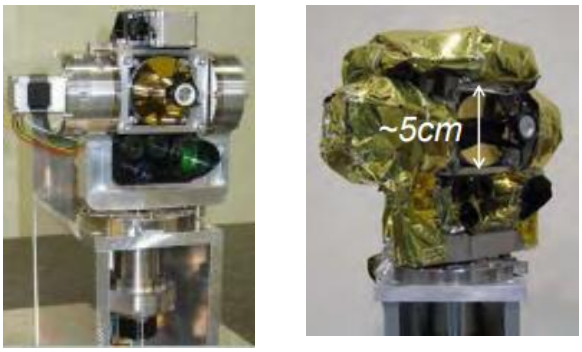


شکل (۹): اولین ارتباط مخابرات لیزری بین ماهواره‌ای توسط ماهواره ژاپنی OICETS [162]



شکل (۱۰): نمای محصول پروازی ترمینال لیزری LUCE [162].

اولین ارتباط LEO به زمین توسط JAXA با استفاده از ترمینال لیزری LUCE و از طریق ماهواره OICETS در سال ۲۰۰۶ انجام شد [50]. در سال ۲۰۱۲ ژاپن یک ماهواره کیوبست 1U به‌نام FITSAT-1 را از طریق بازوی روباتیک ISS عملیاتی کرد [167]. این ماهواره از یک فرستنده آرایه LED، برای انتقال سیگنال کد مورس به زمین استفاده می‌کرد. همچنین در سال ۲۰۱۴، NICT کوچکترین محموله فرستنده مخابراتی توزیع کلید کوانتومی جهان بنام SOTA را بر روی پلتفرم یک ماهواره کوچک با وزن ۵۰ کیلوگرم به‌نام (SOCRATES) و به‌منظور دستیابی به سرعت ۱۰ مگابیت بر ثانیه از مدار LEO با قابلیت اطمینان بسیار بالا را پیاده‌سازی کرد(شکل ۱۱) [84, 166-169].



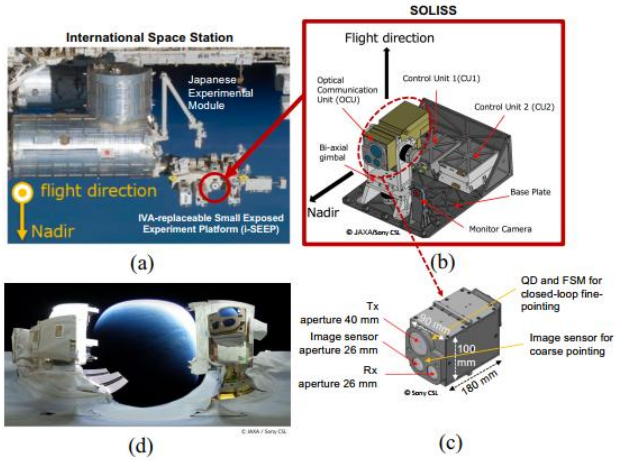
شکل (۱۱): مدل فضایی ترمینال مخابرات لیزری SOTA [161, 162]

در ادامه، NICT ماژول فرستنده اپتیکی بسیار کوچک VSOTA که یک نسخه کوچکتر از SOTA بود را ارائه نمود [168-171].

در اواخر سال ۲۰۱۷ اولین ماهواره از یک پروژه منظومه ماهواره‌ای با نام QZSS (Michibiki in Japanese) با هدف دستیابی به نرخ ارسال1 Gbps، از مدار QZO را در مدار قرار داد و این فرآیند تا کنون ادامه دارد [172, 173].

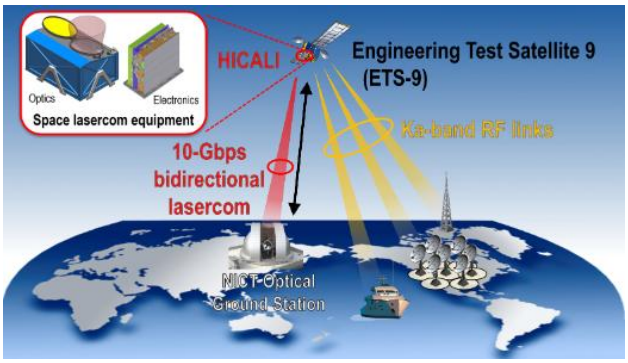
سال ۲۰۱۹، NICT، JAXA و شرکت سونی به طور مشترک تجهیزات یک لینک اپتیکی کوچک برای ایستگاه فضایی بین‌المللی (SOLISS) را توسعه داده‌اند که در بخش بیرونی

ماژول ژاپنی(JEM- Kibo) نصب شد(شکل ۱۲). در سال ۲۰۲۰، یک لینک ارتباطی لیزری اترنت دو طرفه بین ISS و ایستگاه زمینی نوری NICT در کوگانی توکیو، نشان داده شد که تصاویر با وضوح بالا را ارسال می‌کند [107, 174, 175]. در همین سال ژاپن موفق شد با استفاده از ماژول JDRS لینک ارتباط لیزری از GEO به LEO را برقرار کند. نرخ ارسال از GEO در این ماموریت برابر با 1.8 Gbps و نرخ ارسال از LEO به ژئو برابر با 50 Mbps بود.



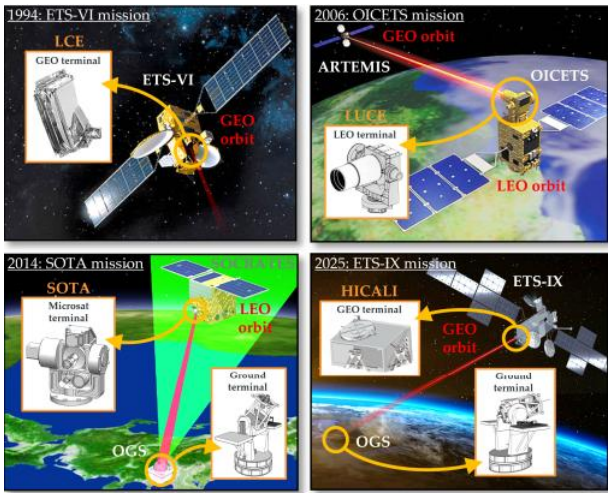
شکل (۱۲): مشخصات کلی ماژول ترمینال مخابرات لیزری SOLISS [107]

در حال حاضر، NICT در حال توسعه ارتباطات لیزری فضایی ۱۰ گیگابیت بر ثانیه با استفاده از ماهواره ژئو ETS-IX (حامل محموله HILICALI) [162, 175-177] که مقرر بود در ۲۰۲۳ پرتاب شود اما پرتاب آن تا ۲۰۲۵ به تعویق افتاده است (شکل ۱۳). پارتنر این ماهواره در LEO یک کیوبست 6U به‌نام CubeSOTA است که مطابق برنامه از ماژول آزمایش ژاپنی (JEM) در ایستگاه فضایی بین المللی در مدار قرار داده خواهد شد. [163, 173].



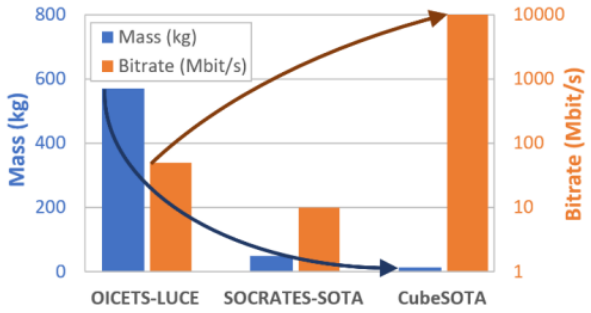
شکل (۱۳): نمای مفهومی HILICALI [177].

به‌عنوان جمع‌بندی، تاریخچه فعالیت‌های اصلی ژاپن در ارتباط با مخابرات لیزری فضایی را میتوان به‌صورت گرافیکی شکل ۱۴ خلاصه نمود.



شکل (۱۴): مایلستون فعالیت‌های اصلی JAXA و NICT در حوزه مخابرات لیزری ماهواره‌ای [128].

شکل ۱۵ نشان‌دهنده ترند کلی فعالیته‌های ژاپن در در گذر زمان است و بیانگر افزایش نرخ ارسال محموله‌ها همزمان با کاهش جرم و ابعاد است.



شکل (۱۵): ترند توسعه JAXA و NICT در حوزه مخابرات لیزری ماهواره‌ای [163].

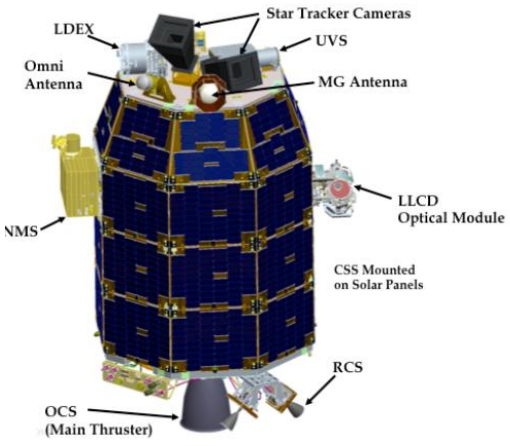
۵-۲- ماموریت های مخابرات لیزری NASA

در سال ۱۹۷۲ اولین انتقال داده uplink از زمین به ماهواره با استفاده از لیزر آرگون به سمت ماهواره GEOS-II انجام شد. در ادامه در سال ۱۹۹۲ در قالب پروژه GOPEX یک پالس لیزر از دو ایستگاه زمینی مختلف به کاوشگر گالیله در ۶ میلیون کیلومتری ارسال شد. در نهایت اولین رسال دوطرفه زمین-فضا در قالب پروژه GOLD به‌صورت مشترک بین NASA- JAXA انجام شد [38, 39, 159]. در سال ۲۰۰۰ به‌منظور بررسی بیشتر و عملیاتی فرآیند نشانه‌روی دقیق و همچنین Acquisition و

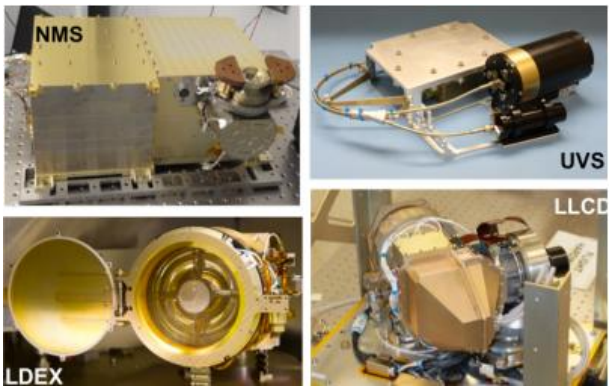
Tracking با استفاده پلتفرم LTES برای نرخ ارسال بالاتر از 1 Gbps از LEO به زمین انجام شد [178].

به‌منظور برقراری اولین لینک دوطرفهdeep space، برای مأموریت ارتباطات لیزری ماه، محموله لیزری اپتیکی (LLCD) بر روی فضاپیمای (LADEE) نصب شد (شکل ۱۳) و یک لینک پایدار باسرعت انتقال داده ۶۲۲ مگابیت بر ثانیه مستقیم به زمین در سال ۲۰۱۳ از مدار ماه (۴۰۰۰۰۰ کیلومتر) ایجاد شد. این یک دستاورد فوق العاده در لینک‌های مستقیم لیزری در اعماق فضا و انتقال تدریجی آن بر مبنای یک شبکه فضایی در آینده است [179, 180]. در این پروژه برای نخستین بار NASA، از ایستگاه اپتیکال ESA در Tenerife اسپانیا ارتباط برقرار کرد. از منظر فنی، جرم محموله اپتیکی برابر ۳۰,۷ کیلوگرم و مصرف نسبتاً سه چهارم انرژی مورد نیاز برای مدارگرد شناسایی ماه (LRO) بود که پیش از این مورد استفاده قرار گرفته بود [181]. بنابراین ماموریتLLCD (شکل ۱۶ و ۱۷) عملکرد فوق‌العاده‌ای را نسبت به پروژه LRO نشان داد که تنها ۱۰۰ مگابیت در ثانیه با استفاده از باند فرکانسی ka ارسال می‌کند [39].

فضاپیمای LADEE)۳۸۳ کیلوگرم) که در دسته‌بندی ماهواره‌های کوچک (≥ ۵۰۰ کیلوگرم) در نظر گرفته می‌شود [75, 119, 182, 183]، توانست راه را برای پتانسیل استفاده از محموله‌های مخابراتی لیزری بر روی پلتفرم‌های میکروماهواره‌ها و یا ماهواره‌هایی با منابع بسیار محدودتر نظیر کیوب‌ست‌ها باز کند.



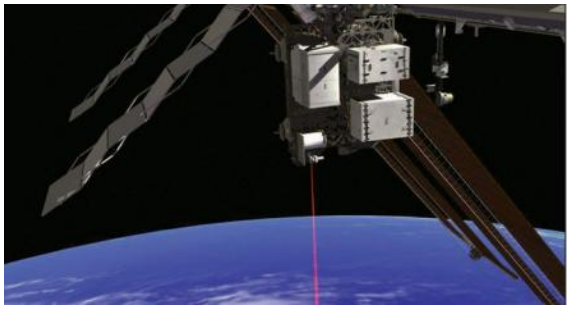
شکل (۱۶): نمای پلتفرم LADEE و ترمینال لیزری LLCD



شکل (۱۷): محموله‌های فضاپیمای LADEE شامل ترمینال لیزری LLCD [184].

در سال ۲۰۱۴، NASA یک لینک ارتباطی نوری را از محموله OPALS (محموله اپتیکی برای علوم lasercom) که در ایستگاه فضایی بین‌المللی نصب شده بود، پیاده‌سازی کرد. محموله OPALS ۱۵۹ کیلوگرم وزن داشت و نرخ انتقال داده ۵۰ مگابیت در ثانیه را ارائه می‌کرد (شکل ۱۸ و ۱۹) [185, 186].

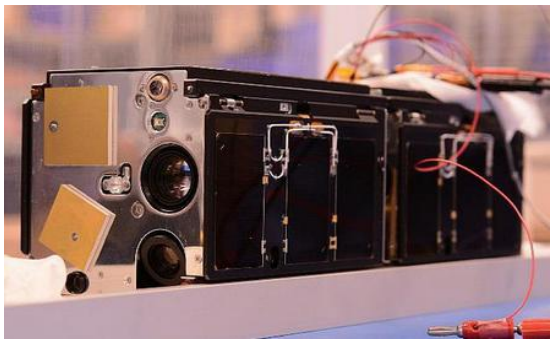
شکل (۱۸): مدل فضایی محموله لیزری OPALS [187, 188].



شکل (۱۹): نمای مفهومی عملیات محموله لیزری OPALS بر روی ISS [187, 188].

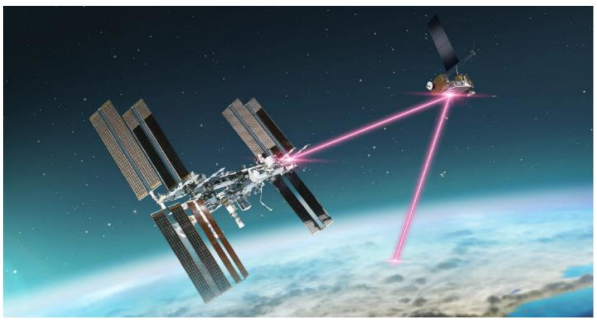
از اواخر ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۱۷ به‌منظور برقراری اولین ارتباط لیزری با استفاده از کیوبست، NASA سه کیوبست 1.5U را با نام های AeroCube OCSD-A, OCSD-B, OCSD-C (شکل ۱۷) را به مدار LEO پرتاب کرد [189-191]. نرخ ارسال از

100 Mbps الی 1.2 Gbps، به‌عنوان خروجی عملکرد این پروژه ثبت شده است و تا 2.5 Gbps قابل ارتقا است.



شکل (۲۰): مدل پروازی AeroCube OCSD-B, C [190]

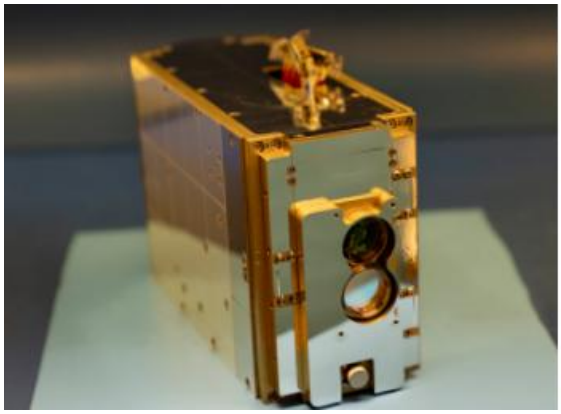
NASA ماموریت رله ارتباطات لیزری (LCRD) را با هدف سرعت انتقال ۱,۲۲ گیگابیت بر ثانیه را در سال ۲۰۲۱ با موفقیت انجام داد. ماژول ILLUMA-T که شامل محموله LEO LCRD و مودم‌ها و تقویت‌کننده‌های مربوطه و همینطور شامل ملزومات اتصال به ISS بود، توسط NASA و آزمایشگاه MIT لینکلن توسعه یافت [120, 192]. شکل ۲۱ نمای مفهومی ارتباط رله بین LCRD و ILLUMA-T و ایستگاه زمینی را نمایش می‌دهد.



شکل (۲۱): نمای مفهومی ارتباط رله بین LCRD و ILLUMA-T و ایستگاه زمینی [193].

در ۲۰۲۲ NASA و MIT به‌صورت مشترک ترمنیال اپتیکی TBIRD را برای نرخ ارسال 100 Gbps (قابل ارتقا تا 200 Gbps) از مدار LEO به زمین را عملیاتی کرد (شکل ۲۲) [114-116].

شکل (۲۲): مدل پروازی محموله TBIRD [116].

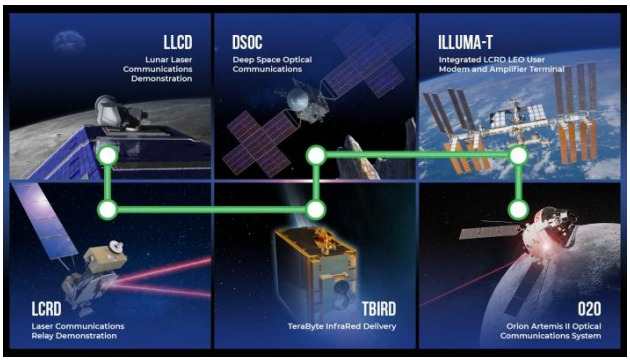


همچنین پروژه"O2O (Optical to Orion)" به عنوان یک سیستم ارتباط اپتیکی پیشرفته برای پشتیبانی از فضاپیمای آرتیمیسII با نرخ ارسال 260Mbps و همچنین دیگر اکتشافات با فضاپیماهای سرنشین‌دار برنامه‌ریزی شده است [121, 122].

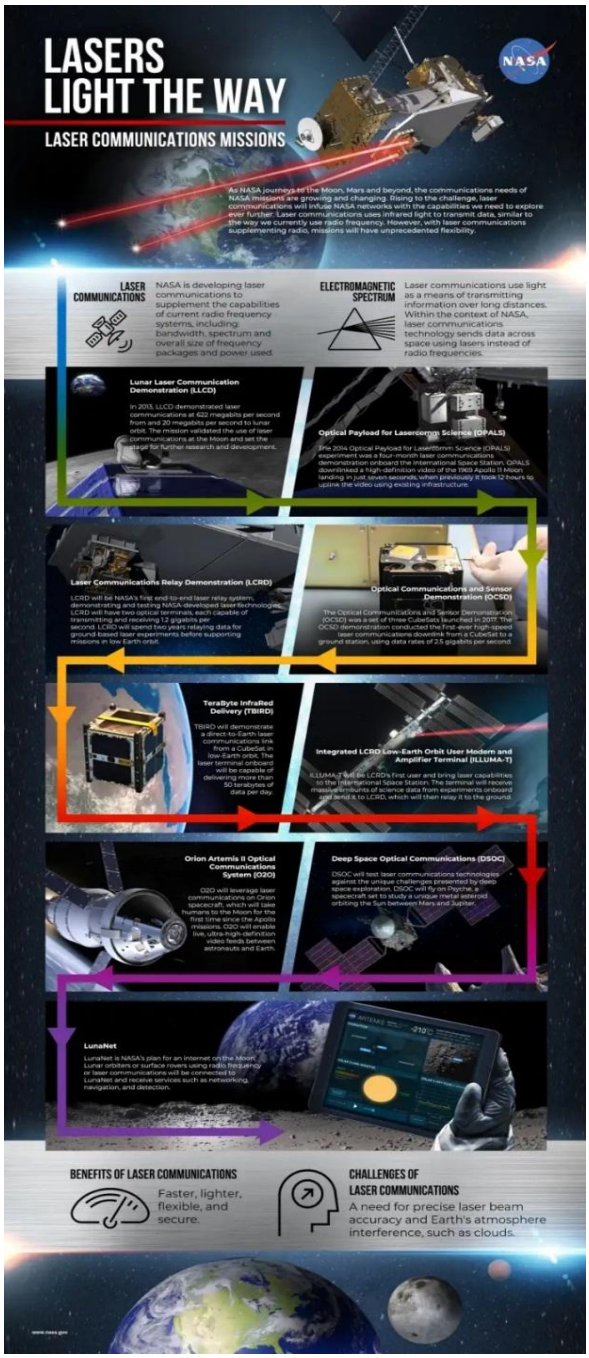
NASA همچنین یک سیستم مخابرات اپتیکی در اعماق فضا که برای ماموریتPsyche (با هدف پرواز در کنار مریخ و فرود بر روی یکی از سیارک‌های آن و برقراری لینک اپتیکی با نرخ 10 Gbps تا فاصله متوسط ۳۰۰ میلیون کیلومتری (در حالت تئوری)) ساخته (شکل ۲۳) و برای بهره‌برداری در سال ۲۰۲۶ برنامه‌ریزی کرده بود را در سال ۲۰۲۳ با موفقیت اجرا نمود [194].

شکل (۲۳): نمای مونتاژ شده فضاپیمای Psyche [195].

در حالت کلی می‌توان ترند تاریخی مهم‌ترین پروژه های NASA در ارتباط با مخابرات لیزری را در اینفوگرافی شکل ۲۴ مشاهده کرد. هدف اصلی تمامی پروژه های NASA ایجاد یک شبکه ارتباطات لیزری پرسرعت فضایی زمین- ماه است که در قالب پروژه LunaNet برنامه‌ریزی شده است (شکل ۲۵).



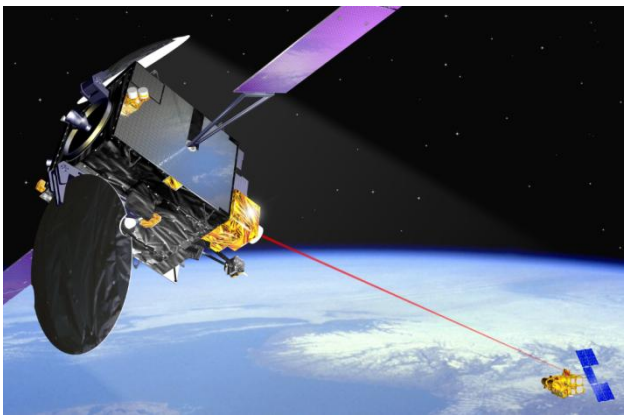
شکل (۲۴): ترند تاریخی پروژه‌های مخابرات لیزری NASA [196].



شکل (۲۵): ترند تاریخی پروژه‌های مخابرات لیزری NASA با هدف انجام پروژه LunaNet [197].

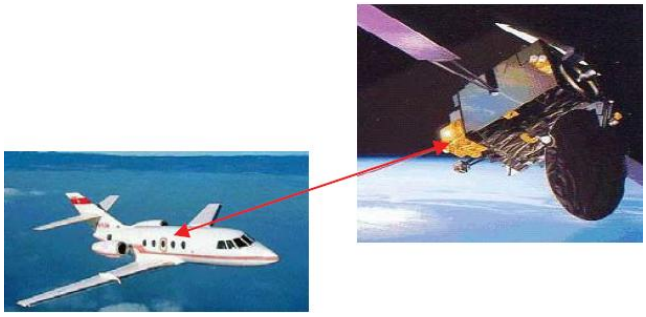
۵-۳- ماموریت های ارتباط لیزری آژانس فضایی اروپا (ESA)

فعالیت‌های مخابرات اپتیکی در اروپا تحت عنوان پروژه SILEX (آزمایش بین ماهواره‌ای لیزر نیمه هادی) [41, 42, 45, 46, 47] از سال ۱۹۹۴ آغاز شد و در سال ۲۰۰۱ بین دو ماهواره ARTEMIS در مدار ژئو، و ماهواره فرانسوی SPOT-4 در مدار LEO با نرخ 50 Mbps عملیاتی شد [198].



شکل (۲۶): نمای مفهومی لینک ارتباطی لیزری بین ماهواره‌های ARTEMIS و SPOT-4 [47].

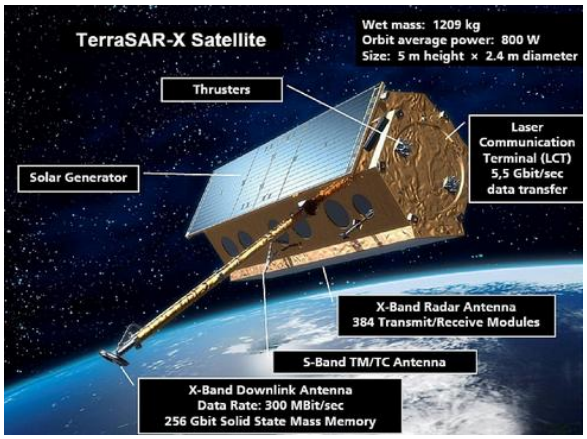
در سال ۲۰۰۶ اولین لینک بین ماهواره و هواپیما با استفاده از ماژول مخابرات لیزری ماهواره آرتمیس در مدار ژئو و ترمینال LOLA بر روی هواپیمای Mystere 20 مربوط به آژانس فضایی فرانسه CNES برای فاصله ۴۰۰۰۰ کیلومتری و نرخ ارسال 50 Mbps (Downlink) و نرخ (Uplink) برابر با 2 Mbps با موفقیت برقرار شد[57, 58, 59, 61]. شکل ۲۷ نمای مفهومی این عملیات را نمایش می‌دهد.



شکل (۲۷): نمای مفهومی لینک لیزری در پروژه LOLA [57].

همزمان پیاده‌سازی لینک اپتیکی بین ماهواره ای دو جهته LEO-to-LEO، با نرخ ارسال 5.5 Gbps برای فاصله ۵۵۰۰ کیلومتر و با سرعت نسبی ۲۵۰۰۰ کیلومتر بر ساعت بین ماهواره آلمانی TerraSAR-X (شکل ۲۸) و ماهواره آمریکایی NFIRE (آزمایش مادون قرمز میدان نزدیک) با استفاده از ماژول LCT شرکت Tesat و در قالب کلان پروژه SILEX در حال اجرا بود

که در سال ۲۰۰۷ عملیات آن با موفقیت انجام شد [199, 200]. نمای مفهومی این عملیات در شکل ۲۹ ارائه شده است.

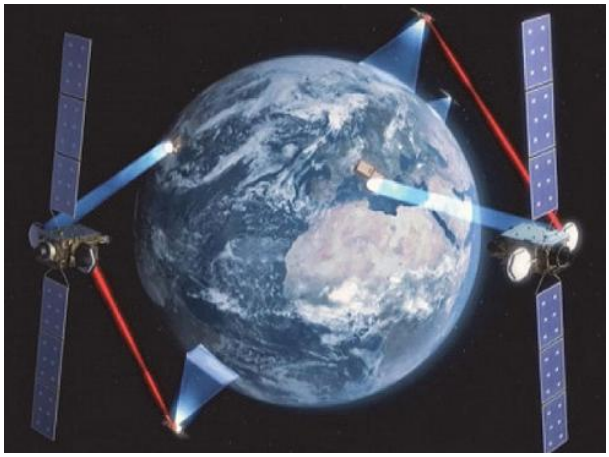


شکل (۲۸): نمای ماهواره آلمانی TERRASAR-x [201].

شکل (۲۹): نمای مفهومی ارتباط بین ماهواره‌ای NFIRE و TERRASAR-X [202].

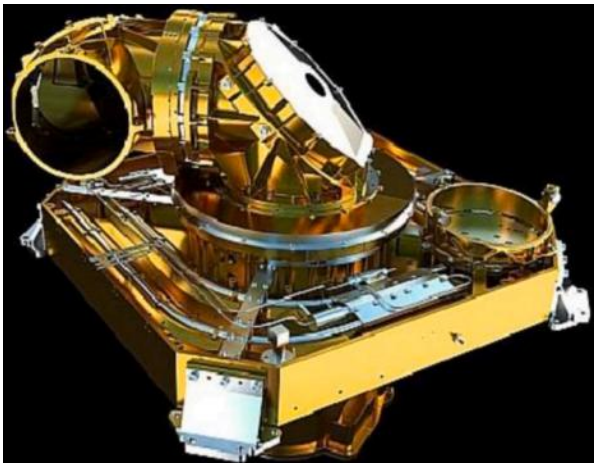
اولین لینک‌های ارتباطی نوری عملیاتی LEO به GEO در جهان در سال ۲۰۱۴ توسط ماهواره Sentinel-1A و ماهواره Alphast (Inmarsat-4A) انجام شد. ماهواره آلفاست در سال ۲۰۱۳ در مدار GEO تزریق شده و حامل یک ترمینال مخابرات اپتیکی از شرکت TESAT بود [79-81]. در این ماموریت ارتباط لیزری بین ماهواره Sentinel-1A در مدار LEO ماهواره آلفاست در مدار GEO برقرار شد و در نهایت دیتا از آلفاست به ایستگاه زمینی منتقل و با موفقیت دریافت شد. نرخ ارسال داده1.8 Gbps برای این ماموریت مدنظر بود. این عملیات مجدد به وسیله Sentinel-2A [203] تثبیت شد. این ماموریت بعنوان بخشی از کلان پروژه سیستم رله داده اروپا (EDRS) برنامه‌ریزی شده بود.

سیستم رله داده اروپا (EDRS) شامل EDRS-A در ماهواره EutelSat–B9، و EDRS-C در ماهواره OHB Hylas-3، دارای ترمینال‌های ارتباط لیزری بر اساس مشخصات مدارهای GEO طراحی شده‌اند تا شبکه رله کامل داده از لینک‌های مختلف از هر نقطه در فضا به ماهواره‌های GEO و از آنجا به زمین را فراهم کنند[204-208]. نمای کلی این سامانه در شکل ۳۰ ارائه شده است.



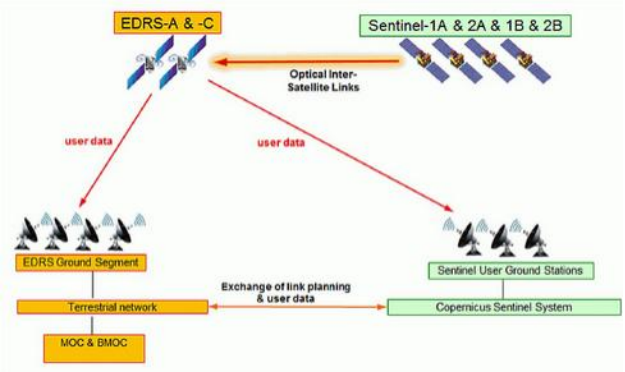
شکل (۳۰): نمای مفهومی سیستم رله داده اروپا (EDRS) [209].

در سال ۲۰۱۶ اولین ماهواره عملیاتی از منظومه EDRS با نام EDRS-A (Eutelsat-9E) در مدار ۹ درجه شرقی ژئو قرار گرفت [209-212]. دومین ماهواره از این منظومه با نام EDRS-C که توسط Airbus ساخته شده بود در مدار ۳۱ درجه شرقی تزریق شد. این ماهواره از یک محموله مخابرات لیزری از شرکت TESAT (شکل ۳۱) استفاده میکرد [213-215].



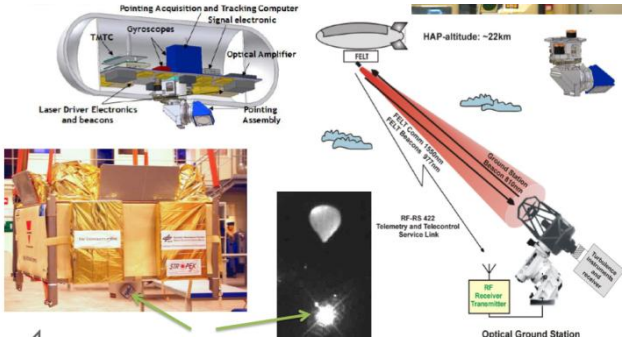
شکل (۳۱): محموله مخابرات لیزری LCT از شرکت TESAT [214].

این ماهواره در سال ۲۰۱۹ به عنوان ماهواره دوم از منظومه EDRS با موفقیت در مدار قرار گرفت. اولین مشتری عملیاتی سیستم رله داده اروپا، ماهواره‌های برنامه کوپرنیکوس یعنی سنتینل-۱ و سنتینل-۲ بوده‌اند [209].



شکل (۳۲): شمای مفهومی سرویس EDRS [209].

بـر اسـاس برنامـه نقشـه راه مخـابرات نـوری DLR OSIRIS (سیستم ارتباط اپتیکی مادون قرمز فضایی) یک منظومه از چهار ماهواره کوچک که از ترمینال‌های ارتباطی لیزری بهره مـی‌برنـد، تشکیل شده است که از سال ۲۰۱۶ عملیـاتی شـد [99]. قبـل از آن، DLR در سال ۲۰۰۵ اولین لینـک بـین سـکوی ارتفـاع بـالا (HAP) از ارتفاع ۲۴ کیلومتری و برد رنـج ۶۴ کیلـومتری بـرای نرخ ارسال 1.25 Gbps را با موفقیت عملیاتی کرد [216-217].



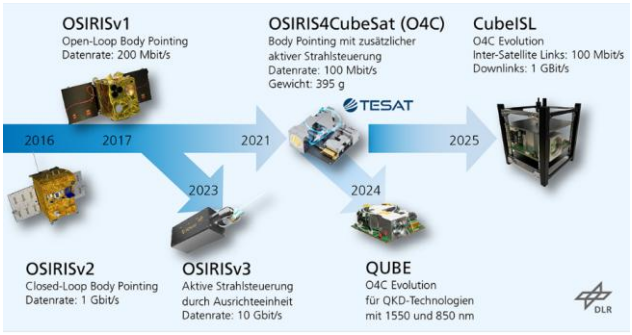
شکل (۳۳): پروژه HAP توسط DLR [217].

در سال ۲۰۰۸ با استفاده از ترمینال LCT شرکت TESAT ارتباط لینک لیزری بین ماهواره TerraSAR-x از DLR و ماهواره آمریکایی N-FIRE با نرخ ارسال 5.5 Gbps با موفقیت انجام شد [53, 56]. در سال ۲۰۰۸ اولین لینک بین هواپیما و زمین نیز از طرف DLR با نرخ ارسال 1.25 Gbps از فاصله ۱۲۰ کیلومتری عملیاتی شد [218, 219]. این آزمون مجددا در سال ۲۰۱۳ و با استفاده از ترمینال مخابرات لیزری شرکت Mynaric و هواپیمای شرکت Airbus با نرخ ارسال 1.25 Gbps از فاصله ۶۰ کیلومتری انجام شد [219]. اولین آزمون‌های مخابرات کوانتومی QKD بین هواپیما به زمین نیز در سال ۲۰۱۱ انجام شد [220]. در نهایت در سال ۲۰۱۶ اولین آزمایش‌های زمینی در سناریوهای معادل ژئو برای دستیابی به نرخ ارسال ۱,۷۲ ترابیت بر ثانیه توسط DLR انجام شد و در سال ۲۰۱۷ با 13.2 Tbps بیشترین نرخ ارسال را در دنیا ثبت کرده‌اند [221, 222].

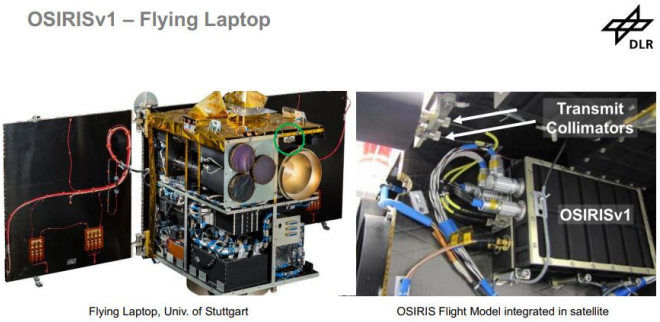
شکل (۳۴): تصویر هواپیمای DO 228 از DLR در حال ارسال سیگنال بیکن توسط ترمینال مخابرات لیزری [219].

شکل (۳۵): تصویر هواپیمای Airbus DS مجهز به ترمینال مخابرات لیزری Mynaric و ایستگاه زمینی اپتیکی DLR [219].

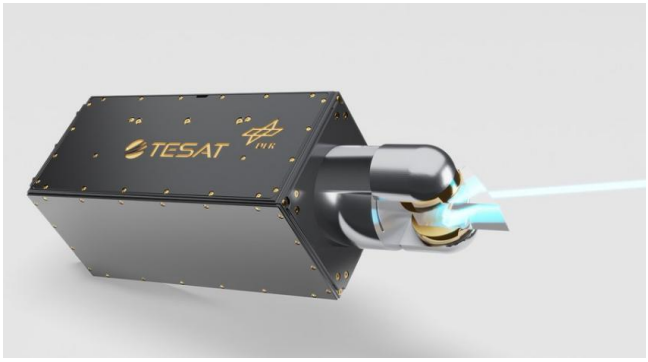
اولین پرتاب از سری OSIRIS بنام BiROS (OSIRISv2) در سال ۲۰۱۶ و پس از آن ماهواره OSIRISv1 Flying Laptop [103, 104, 220] در سال ۲۰۱۷ برای نرخ‌های ارسال از 200 Mbps تا 1 Gbps با موفقیت پرتاب شد. در سال ۲۰۱۸ پروژه OSIRISv3 برای نرخ‌های ارسال ۱۰ الی ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه با موفقیت پرتاب شد [223,224].



شکل (۳۶): برنامه توسعه تجاری مخابرات لیزری DLR [224].

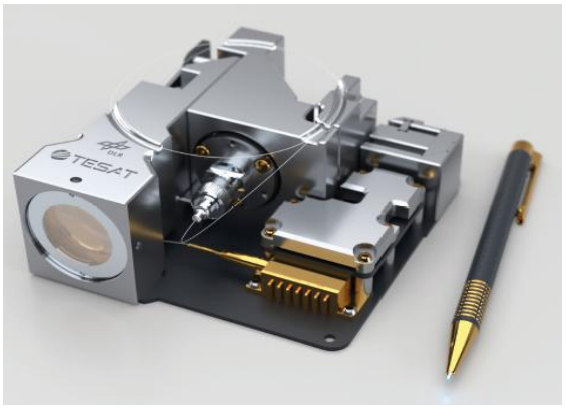


شکل (۳۷): ماهواره Flying Laptop از دانشگاه اشتوتگارت بعنوان اولین گام از برنامه OSIRIS [220].



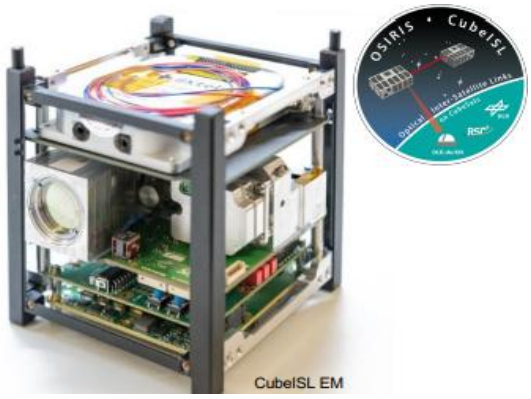
شکل (۳۸): محموله OSIRISv3 [223].

در ادامه و در سال ۲۰۲۱ نیز ماهواره PIXL-1 (OSIRISv4) پرتاب شد که یک کیوبست 3U با محموله ترمینال مخابرات لیزری CubeLCT از شرکت TESAT است که به عنوان کوچکترین ترمینال لیزری فضایی برای نرخ ارسال 100 Mbps فضایی معادل یک سوم U را اشغال خواهد کرد [113].



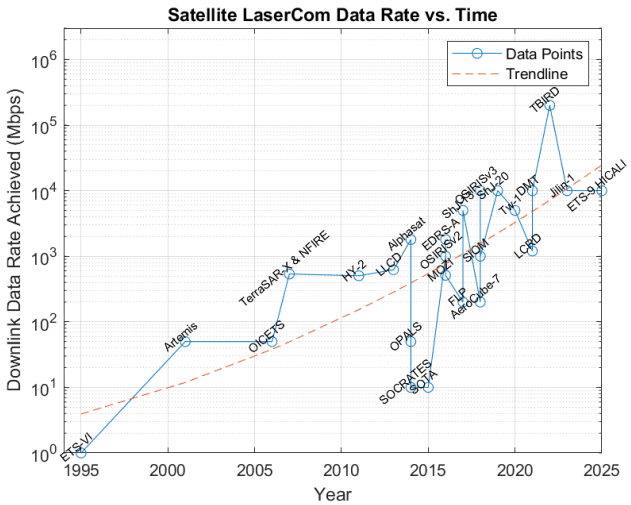
شکل (۳۹): محموله مخابرات لیزری CubeLCT شرکت TESAT [113].

بر اساس دستاوردهای به‌دست آمده از پرتاب Pixl-1، پروژه مخابرات لیزری بین کیوبستی CubeISL نیز توسط DLR در حال انجام است [220].



شکل (۴۰): نمای مدل مهندسی ماهواره مکعبی CubeISL [220].

نمودار شکل ۴۱ ترند کلی تغییرات نرخ ارسال در دهه‌های اخیر را نشان می‌دهد.



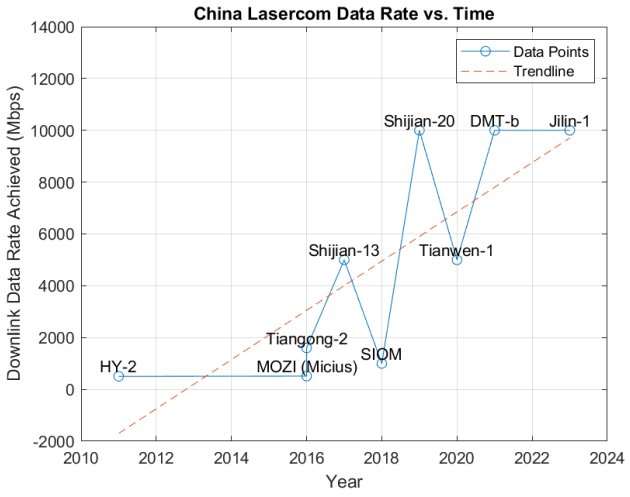
شکل (۴۱): ترند کلی تغییرات نرخ ارسال ماموریت‌های مختلف دارای ترمینال‌های مخابرات لیزری

همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، با افزایش وابستگی ارتباطات در دنیا به ارسال دیتا با حجم بسیار زیاد، نرخ ارسال دیتا نیز

به‌صورت متوالی افزایش پیدا کرده است. از طرفی همزمان با افزایش نرخ دیتا و ارتقای عملکرد ماموریت‌ها، ماهواره‌ها و ترمینال‌های لیزری به سمت کوچکتر و سبک‌تر شدن پیش رفته‌اند.

۵-۴- سازمان فضایی چین:

اولین تلاش موفق چین مربوط به برقراری لینک اپتیکی با نرخ ارسال 504 Mbps توسط ماهواره HY-2 به زمین در سال ۲۰۱۱ است [70, 105, 225]. در سال ۲۰۱۶ ترمینال لیزری SIOM بر روی ماهواره کوانتومی MOZI برای نرخ ارسال 5.12 Gbps از ماهواره و نرخ ارسال 20 Mbps از زمین به ماهواره با موفقیت انجام شد [70, 105]. این ماهواره با نام‌های دیگری نظیر QSS (Quantum Science Satellite) یا QUESS (Quantum Experiments at Space Scale) یا Micius نیز شناخته می‌شود [226]. در همان سال ترمینال ساخته شده توسط مجموعه CAST برای نرخ ارسال 1.6 Gbps از ماهواره Tiangon-2 به ایستگاه زمینی انجام شد [105, 70, 112]. یک سال بعد در سال ۲۰۱۷ اولین آزمایش درهم تنیدگی کوانتومی از فضا با استفاده از ماهواره LEO Micius برای نرخ ارسال 5.12 Gbps انجام شد [70, 105, 225, 226]. در همان سال در قالب پروژه shijian-13 اولین آزمایش لینک ارتباط لیزری از GEO به LEO با نرخ ارسال 5 Gbps برقرار شد [70, 105, 225]. در اوایل سال ۲۰۱۸ اولین بار ارتباط لیزری MEO-MEO و IGSO-IGSO با استفاده از ماژول SIOM با نرخ 1 Gbps برقرار شد [70, 105]. اواخر سال ۲۰۱۹ از طرف CASC-5 در قالب پروژه Shijian-20 نرخ ارسال 10 Gbps بین GEO و زمین برقرار شد [70, 105, 225]. در سال ۲۰۲۰ ماهواره Xingyuan-2 یک ترمینال مخابرات لیزری از طرف شرکت LaserFleet برای برقراری نرخ ارسال 100 Mbps برای لینک بین ماهواره‌ای LEO-LEO و ماهواره به زمین را عملیاتی کرد [70, 105]. در اواخر ۲۰۲۰ پروژه Tianwen-1 برای اکتشافات مریخ و با هدف نرخ انتقال داده تا 5 Gbps عملیاتی شد که در فوریه ۲۰۲۱ با موفقیت بر روی ماه فرود آمد [227]. در سال ۲۰۲۱ ماهواره DMT-β با استفاده از ماژول مخابرات لیزری SIOM برای نرخ ارسال 10 Gbps برای لینک بین ماهواره‌ای LEO-LEO استفاده کرد [70]. در نهایت در سال ۲۰۲۳ در قالب پروژه Jilin-1 با استفاده از ماژول CGS نرخ ارسال 10 Gbps برای مدار LEO به زمین مورد بهره برداری قرار گرفت [70, 105].



شکل (۴۲): تغییرات نرخ ارسال در ماموریت‌های مخابرات لیزری چین

۵-۵- دیگر مجموعه‌های فضایی و شرکت‌های پیشرو خصوصی و بین المللی

در سال ۲۰۱۱ روسیه ترمینال مخابرات لیزری BTLS را در ایستگاه فضایی مستقر و موفق به برقراری ارتباط با ایستگاه زمینی با نرخ‌های ۱۲۵ و ۶۲۲ مگابیت بر ثانیه شد [72, 162]. این سیستم از دو ترمینال BTLS-N در بدنه بیرونی ISS و BTLS-V، در داخل ISS تشکیل شده است. توان ارسالی این ترمینال برابر با ۶ وات ثبت شده است [72, 228].

شکل (۴۳): ماژول ترمینال لیزری BTLS روسیه [228].

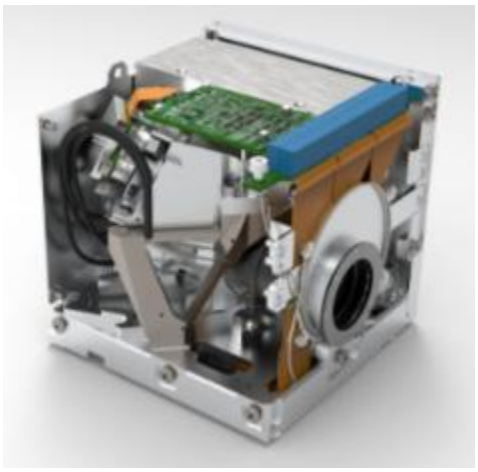
شکل (۴۴): ماژول فرستنده/گیرنده زمینی NLT-1 [228].

مجموعه فضایی DARPA در پروژه‌های جاری خود مثل Blackjack و Space-BACN برای نرخ ارسال تا 10 Gbps در حال برنامه ریزی است و از ترمینال‌های مخابرات لیزری شرکت Mynaric استفاده خواهد کرد [231-229]. دانشگاه MIT تاکنون چندین پروژه موفق را برای مجموعه NASA راهبری کرده است. علاوه بر آن، این دانشگاه در حال توسعه ماژول‌هایی برای کیوب‌ست‌ها نیز است که از آن‌جمله ترمینال CLICK-A در ۲۰۱۸ برای نرخ ارسال 10 Mbps با موفقیت پرتاب شد. پرتاب محموله CLICK-B/C نیز برای نرخ ارسال 20Mbps در سال ۲۰۲۲ با موفقیت عملیاتی شد [105, 232].

شرکت oneWeb از سال ۲۰۱۹ در حال پرتاب و ایجاد یک منظومه برای دستیابی به سرعت هایی از چندین مرتبه Gbps است [131, 233].

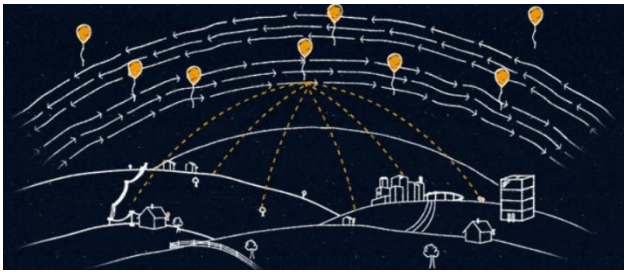
پروژه استارلینک SpaceX از سال ۲۰۱۹ در حال ایجاد یک منظومه است که هر ترمینال آن شبکه نرخی معادل 1 Gbps را برآورده نماید و از ترمینال‌های مخابرات لیزری شرکت Mynaric استفاده خواهد کرد [238-234].

شرکت AAC Clyde Space نیز به عنوان یک شرکت خصوصی چند ملیتی پیشرو ماژول ترمینال لیزری کیوبستی خود با وزن 1.33 کیلوگرم، توان مصرفی بیشینه ۱۵ وات و نرخ ارسال حداکثر 1Gbps رونمایی کرده است که مطابق اعلام شرکت در سال ۲۰۲۳ در فضا عملیاتی شده است [239].



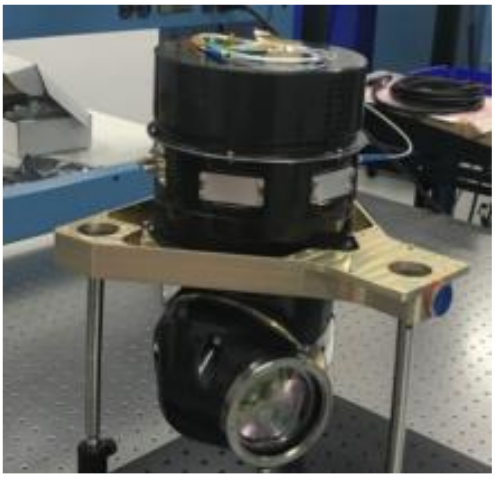
شکل (۴۵): محموله مخابرات لیزری cubecat [239].

شرکت Google در سال ۲۰۱۵ اولین لینک مخابرات اپتیکی بین منظومه‌ای از بالن‌ها و ایستگاه زمینی را در قالب پروژه Loon با استفاده از ترمینال‌های لیزری شرکت Mynaric با هدف دستیابی به نرخ ارسال ۱۵۵ مگابیت بر ثانیه از فاصله ۱۰۰ کیلومتری را عملیاتی کرد [240, 241].



شکل (۴۶): نمای مفهومی پروژه Google Loon [241].

در سال ۲۰۱۸ شرکت Facebook با استفاده از ماژول‌های MLT-70-ATG از شرکت Mynaric و با ایده استفاده از یک شبکه مجموعه‌ای از UAV و دیگر ریزپرنده‌ها برای نرخ ارسال 10Gbps به‌منظور ارائه اینترنت پرسرعت در تمام مناطق پروژه خودش را عملیاتی کرد [242].



شکل (۴۷): محموله مخابرات لیزری فیسبوک [217].

۶- بررسی شرکت‌های پیشرو

مطرح‌ترین شرکت‌های سازنده ترمینال‌های مخابرات لیزری ماهواره‌ای، شرکت‌های TESAT، Mynaric هستند که در ادامه وضعیت این شرکت‌ها و محصولاتشان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

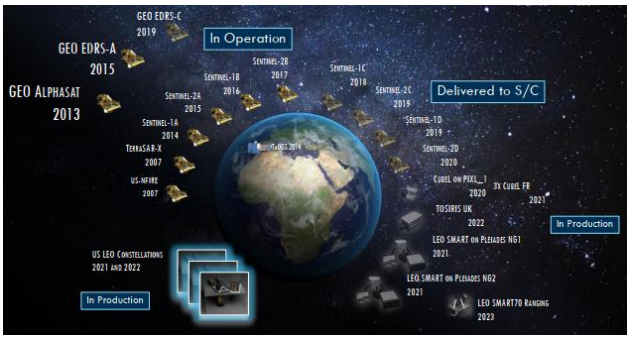
❖ شرکت TESAT

هرچند شرکت TESAT رسما از سال ۲۰۰۱ با این نام شناخته می‌شود و فعالیت تخصصی در ساخت و تولید ترمینال‌های مخابرات لیزری را آغاز کرد، اما در تاریخچه شرکت مشخص است که از دهه ۱۹۷۰ در حوزه هوافضا فعالیت داشته است [243] از سال ۲۰۰۷ که محصولات این شرکت رسما سابقه حضور عملیاتی در فضا را پیدا کردند تا کنون بیش از ۵۶ ترمینال لیزری این شرکت در فضا عملیات داشته‌اند [244]. امروزه ترمینال‌های لیزری TOSIRIS، SmartLCT، CubeLCT، ConLCT، LCT135 و ... از شرکت TESAT به‌عنوان محصولات پیشرو در فضا عملیاتی شده‌اند و تاکنون ۸۲۰۰۰ لینک عملیاتی موفق برقرار شده است [245]. مشخصات اصلی ترمینال‌های لیزری این شرکت بر اساس اولین تجربه حضور در فضا، در جدول زیر ارائه شده است [247 -245]:

جدول (۲): مشخصات کلی ترمینال‌های لیزری TESAT

First flight	Model	Data rate	Type	System budget
2007	SCOT135 [248]	2.5 – 10 Gbps	MEO & GEO constellation up to 80000 km	75-340 W, 28 kg, optic: 40*68*40 & electronic 22*27*20 cm^3
2007	SCOT80 [249]	2.5 – 10 Gbps	LEO constellation up to 8000 km	60-80 W, 11.9 kg, optic: 31*29*47 & electronic 26*19*24 cm^3
2013	LCT135 [250]	1.85 Gbps	Up to 80000 km (GEO-GEO, GEO-LEO, GE-Airborn, GEO-GND	120 W, 53 kg, 60*60*70 cm^3
2019	TOSIRIS [251]	1.25 to 10 Gbps	LEO-GND	40W, 8 kg, 28*20*15
2020	SmartLCT70 [252]	1.85 Gbps	LEO-GEO	150 W, 30 kg, 35*35*20 cm^3
2020	ConLCT80 [253, 254]	10Gbps	LEO Constellation	
2021	CubeLCT [255]	100 Mbps	LEO-GND	10 W, 397 gr, 9*9.5*3.5 cm^3
2025 (predicted)	SCOT20 [256]	100 Mbps	LEO-LEO, LEO-GND	35W, 1.6 kg, 10*10*11.35 cm^3

یک نمای کلی از ترند توسعه تکنولوژی محصولات TESAT در شکل ۴۸ ارائه شده است (تاریخ ارائه ۲۰۲۱):



شکل (۴۸): ترند توسعه ترمینال‌های مخابرات لیزری شرکت TESAT [245].

❖ شرکت Mynaric

شرکت Mynaric در سال ۲۰۰۹ تاسیس شد و اولین محصول ترمینال لیزری هوابرد آن در سال ۲۰۱۳ توسط DLR تست شد. بعدها در سال ۲۰۱۸ در پروژه اینترنت پرسرعت شرکت فیسبوک برای دستیابی به نرخ ارسال 10 Gbps از محصولات این شرکت استفاده شد [240, 241]. دو مدل Mk2 و Mk3 از معروفترین محصولات این شرکت هستند،که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. در حال حاضر Mynaric، با برنامه DARPA's Blackjack [229-231]، ماموریتReOrbit's UKKO [257]، ماهواره‌های Tranche1 از شرکت Northtrop Grumman [258]، ماموریت NExT از شرکت Loft Federal [259]، شرکت York Space System [260]، منظومه ماهواره‌های ژاپنی WARPSPACE [261]، برنامه Tranche 2 transport layer از شرکت Rocket Lab [262]، پروژه QuNET از طرف DLR [263]، برنامه Pegasus به عنوان بخشی از برنامه ScyLight و پروژه Hydron از طرف ESA [264]، شرکت Raytheon Technologies [265]، شرکت SpaceLink [234-236, 266,268]، شرکت هندی JR Aerospace [269] و شرکت Cloud Constelation [270] قرارداد تحویل بیش از چندین هزار ترمینال لیزری را در دست اجرا دارد. مشخصات کلی دو ترمینال مخابرات لیزری اصلی این شرکت در جدول ۳ ارائه شده است [232, 271-273].

جدول (۳): مشخصات کلی ترمینال‌های لیزری Mynaric

Model	MK2	MK3
Data rate	312.5 Mbps to 1.25 Gbps	313 Mbps to 2.5 Gbps
Distance	5000 km	6500 km
Wavelength	1536 to 1553 nm	1536 to 1553 nm
Aperture	80 mm	80 mm
Transmit Power	1 W	4 W
Dimension	Optical System : 573.3 x 271.6 x 230 mm, Optical Communication	Optical System : 343.5 x 210 x 170 mm, Optical

	Controller : 340 x 259 x 163 mm	Communication Controller : 150 x 170 x 207 mm

❖ دیگر شرکت‌ها

از دیگر شرکت‌های دارای محصول تجاری شده می‌توان به AAC Clyde Space، Space Micro، Astrogate Labs، Thales Alenia Space، Astrolight، iXblue، General Atomics و MOSTCOM اشاره کرد که مشخصات کلی محصولات هرکدام در جدول ۴ ارائه شده است:

جدول (۴): مشخصات ترمینال‌های مخابرات لیزری تجاری

Manufacturer	Model	Range	Specifications
Thales Alenia Space	Optel-μ [274]	LEO-GND	2 Gbps, 8U, 43W, 8 kg
AAC clyde Space	CubeCat [239]	LEO-GND	Up to 1Gbps downlink & 200kbps uplink, 1U, 15W, 1.33kg
Space Micro	μLCT SINGLE APERTURE OHA [275]	GEO-MEO-LEO (80000 km)	Up to 100Gbps, ,scalable optical head assembly (1cm to 20cm aperture)
	μLCT DUAL APERTURE OHA [276]	LEO-MEO	Up to 200Gbps,scalable optical head assembly (1cm to 20cm aperture), 26 kg, 168W
	μLCT™ 100 Gbps Lasercom Terminal [277]	LEO-MEO	Up to 100Gbps, 10cm aperture, 28kg, 160W
Astrogate Labs	ASTRO-LINK [278]	LEO-GND	1 Gbps (Upgarades: 2.5 Gbps & 10 Gbps versions), 95 x 95 x 80 mm
Astrolight	ATLAS-1 [279]	LEO-GND	1Mbps to 12.5 Gbps, 2.5 kg, 1.8U, 1 to 5W transmition power, 30W power consumption
General Atomics	SDA v3.0 OCT [280]	GEO	2.5 Gbps, 70/135/225 mm aperture, 10W,
MOSTCOM	SOT-90 [281]	5000 km	45*30*38 cm^3, 60W, 16 kg
	SOT-150 [281]	50000 km	60*40*48 cm^3, 100W, 50 kg

۷- درآمدی بر نقشه راه توسعه فناوری مخابرات لیزری ماهواره‌ای در ایران

با توجه به بررسی انجام شده در این مقاله و مشاهده سرعت شتابان ایجاد شبکه‌های مخابرات اپتیکی ماهواره‌ای و ترند توسعه این فناوری در سطح دنیا و با در نظر گرفتن وضعیت فعلی کشور، که در گام‌های ابتدایی استفاده از مخابرات لیزری است، تدوین یک راهبرد دقیق و نقشه راه کلان ضروری است. این نقشه راه باید به عنوان یک راهنمای عملی برای محققان، صنایع و سیاست‌گذاران عمل کند و مراحل مختلف توسعه این فناوری، از ابتدایی‌ترین گام‌ها تا دستیابی به فناوری ارتباطات بین ماهواره‌ای اپتیکی را مشخص کند. در حالت کلی به سیاستگذار، مراحل زیر جهت تدوین نقشه راه و عملیاتی نمودن آن پیشنهاد می‌شود. همانطور که در این مطالعه اشاره شد با توجه به هزینه بسیار، ایجاد شبکه‌های مخابرات لیزری ماهواره‌ای بخصوص از منظر زیرساخت، در دنیا یک همکاری بین‌المللی جهت استفاده از منابع مشترک برای کاهش هزینه‌ها و بهره‌وری و سرعت بالا ایجاد شده است که با توجه به ضرورت‌ها پیشنهاد می‌شود ایران نیز جهت همگام شدن با جامعه فنی جهانی به این مجامع بپیوندد. از طرفی با توجه به محدودیت‌های همکاری‌های بین‌المللی و شرایط خاص کشور و نگاه به رشد شتابان چین در این حوزه، بنظر میرسد در صورت استفاده از تجربه چین، مسیر توسعه این فناوری در ایران نیز تسریع و تسهیل شود.

در حالت کلی ۹ مرحله کلان زیر برای تدوین راهبرد و یک نقشه‌راه مشخص پیشنهاد می‌شود. ضروری است که هر کدام از مراحل به دقت به زیرپروژه‌های با اهداف مشخص و ملموس در مسیر توسعه تکنولوژی شکسته شوند.

۱- تعیین دقیق اهداف بلندمدت و کوتاه‌مدت:

اهداف بلندمدت و کوتاه مدت توسعه ترمینال‌های لیزری در سطح آژانس فضایی یک کشور را میتوان به‌صورت زیر تعریف و ارائه کرد:

- ***اهداف بلندمدت***

دستیابی به خودکفایی کامل در فناوری: هدف نهایی باید رسیدن به نقطه‌ای باشد که ایران بتواند به صورت مستقل تمامی تجهیزات و زیرساخت‌های مورد نیاز برای مخابرات لیزری ماهواره‌ای را طراحی، تولید و بهره‌برداری کند.

ایجاد زیرساخت ملی ارتباطات ماهواره‌ای: هدف بلند مدت دیگر باید توسعه کامل منظومه‌ای از ماهواره‌های مخابراتی عملیاتی با استفاده از فناوری لیزر باشد که بتواند پوشش ارتباطی سراسری و با کیفیت بالا را در کشور فراهم کند.

شرکت در بازارهای جهانی: تولید و صادرات تجهیزات و خدمات مخابرات لیزری ماهواره‌ای به سایر کشورهای منطقه می‌تواند یک هدف بلند مدت دیگر باشد.

توسعه کاربردهای نوین: با توجه به گسترش روزافزون کاربردهای متنوع مخابرات لیزری، استفاده از سرریز توسعه این فناوری در حوزه‌های مختلف مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، و ارتباطات امن می‌تواند به عنوان یک هدف جذاب بلند مدت دیگر در نظر گرفته شود که باعث ایجاد تحول در بخش‌های زیادی از ساختار تکنولوژیکی کشور باشد.

- ***اهداف کوتاه‌مدت:***

توسعه آزمایشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی: در کوتاه مدت می‌توان تجهیز و ارتقای آزمایشگاه‌های موجود و ایجاد مراکز تحقیقاتی تخصصی در زمینه لیزر، اپتیک و مخابرات اپتیکی ماهواره‌ای در راستای اهداف بلند مدت را برنامه‌ریزی کرد.

آموزش نیروی انسانی متخصص: در کوتاه مدت و با برگزاری دوره‌های آموزشی تخصصی و حمایت از دانشجویان تحصیلات تکمیلی در این حوزه می‌توان توسعه نیروی انسانی کارآمد را هدف گذاری کرد.

توسعه نمونه‌های آزمایشگاهی: با توجه به وضعیت بلوغ این فناوری در کشور، باید ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تجهیزات و سیستم‌های ارتباطی لیزری برای انجام آزمون‌های اولیه و بروزرسانی ارزیابی از ادامه مسیر، با همکاری شبکه دانشگاهی فعال، یکی از اهداف کوتاه مدت این نقشه راه باشد.

توسعه همکاری با صنایع داخلی و ایجاد شبکه همکار: در هدف‌گذاری کوتاه مدت میتوان با ایجاد ارتباط بین دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان و صنایع مرتبط، یک شبکه همکار فعال در راستای تجاری‌سازی نتایج تحقیقات در بلند مدت ایجاد کرد.

شرکت در پروژه‌های بین‌المللی: مشارکت در پروژه‌های مشترک با سایر کشورها برای دستیابی به دانش و فناوری‌های جدید می‌تواند مسیر توسعه تکنولوژی را کوتاه‌تر و دستیابی به فناوری را تسهیل کند. بنابراین هدف‌گذاری جلب مشارکت بین‌المللی، با در نظر گرفتن شرایط کشور، می‌تواند یک گام راهبردی موثر در طول مسیر باشد.

تدوین استانداردهای ملی: به‌منظور ایجاد همزبانی در شبکه‌های همکار و با توجه به هدف‌گذاری بلند مدت و با هدف دستیابی به خودکفایی کامل در این فناوری، تدوین استانداردهای ملی و یا بومی‌سازی استانداردهای بین‌المللی برای تجهیزات و سیستم‌های ارتباطی لیزری می‌تواند بعنوان یک گام موثر میانی در این نقشه راه در نظر گرفته شود.

دقت شود که هدف‌گذاری کوتاه مدت و بلند مدت باید بر اساس وضعیت کنونی فناوری کشور، نیازهای فعلی و آتی، ظرفیت‌های صنعتی، تغییرات و ترند توسعه فناوری در جهان و با توجه به سیاست‌های کلان کشور در حوزه فضایی باشد. بر همین اساس پیشنهاد می‌شود یک کمیته راهبردی متشکل از نمایندگان دانشگاه‌ها، صنایع، مراکز تحقیقاتی و دستگاه‌های دولتی برای تعیین دقیق اهداف و ارائه به سیاستگذار تشکیل شود. همچنین تخصیص بودجه کافی و تسهیل همکاری‌های بین المللی از دیگر ضروریات این مرحله است.

۲- شناسایی کامل نقاط قوت و ضعف:

یکی از اصلی‌ترین مراحل در تدوین نقشه‌راه و هدف‌گذاری واقعی، شناخت کامل از نقاط قوت و ضعف در مرحله آغاز بکار است.

نقاط قوت: پتانسیل بالای نیروی انسانی، تسریع در عبور از TRL پایین با توجه به شرایط و وضعیت فعلی دانشگاه‌های کشور، وجود صنایع فضایی در حال رشد، حمایت دولت از فناوری‌های نوین.

نقاط ضعف: کمبود منابع مالی، نبود زیرساخت‌های آزمایشگاهی پیشرفته، عدم وجود استانداردهای ملی، محدودیت‌های فناوری، توسعه ناهمگون صنعت فضایی در کشور، عدم شفافیت در راهبرد کلان

۳- تعیین اولویت‌ها براساس شرایط جاری کشور:

ضروری است که هدف‌گذاری توسعه داخلی بخش‌های مختلف این فناوری با توجه به وضعیت جاری و نیاز آتی کشور صورت پذیرد. برای مثال میتوان توسعه موارد زیر را هدف‌گذاری کرد و ساخت و توسعه بخش‌هایی مثل آشکارسازها و ... را از این هدف‌گذاری خارج کرد:

توسعه فناوری لیزر: مرکز بر توسعه لیزرهای با توان بالا، پایداری بالا و اندازه کوچک.

توسعه سیستم‌های اپتیکی: طراحی و ساخت سیستم‌های اپتیکی با قابلیت ردیابی و هدایت دقیق پرتو لیزر.

توسعه الگوریتم‌های ردگیری و کنترل: در تلفیق با بخش قبلی، نیاز به توسعه الگوریتم‌ها و همچنین ایجاد قابلیت‌های سخت‌افزاری در زمینه ردگیری و نشانه‌روی دقیق و پایدار بین فرستنده و گیرنده لیزری

توسعه نرم‌افزارهای کنترل و پردازش داده: طراحی و توسعه نرم‌افزارهای پیشرفته برای کنترل سیستم‌های ارتباطی لیزری و پردازش داده‌های دریافتی.

۴- ایجاد زیرساخت‌های آزمایشگاهی:

متناسب با هدف‌گذاری کوتاه مدت، بروزرسانی و تجهیز آزمایشگاه‌های موجود و ساخت آزمایشگاه‌های جدید مخابرات لیزری در قالب آزمایشگاه ملی و همچنین ایجاد تسهیلات آزمایشگاهی برای دانشگاه‌های فعال و حمایت از توسعه آزمایشگاه‌های تخصصی دانشگاهی، باید بعنوان گام‌های نخستین در نقشه‌راه در نظر گرفته شود.

۵- همکاری با دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی:

با توجه به وضعیت بلوغ فناوری، در کوتاه مدت باید شبکه‌ای از دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی فعال در زمینه مخابرات لیزری شناسایی شده و بر روی مستعدترین دانشگاه‌ها سرمایه‌گذاری بلندمدت انجام شود.

علاوه بر آن، حمایت از پروژه‌های تحقیقاتی مشترک، پایان‌نامه‌ها و طرح‌های تحقیقاتی هدفمند و بر اساس گام‌های دقیق نقشه راه، نیز به توسعه همکاری با دانشگاه‌ها خواهد انجامید.

۶- تدوین استانداردهای ملی:

با توجه به هدف‌گذاری، به‌منظور سازگاری بخش‌های مختلف و جلوگیری از اتلاف وقت ناشی از آن، تدوین استانداردهای ملی یا بومی‌سازی استانداردهای بین‌المللی و تهیه اسناد مرجع بالادستی برای تجهیزات و سیستم‌های ارتباطی لیزری را میتوان به عنوان گام‌های اول در نظر گرفت.

۷- تربیت نیروی انسانی متخصص:

با توجه به هدف‌گذاری کوتاه و بلندمدت، حمایت از آموزش نیروی انسانی متخصص در زمینه اپتیک، لیزر، الکترونیک و مخابرات اپتیکی از ضرورت‌های کوتاه مدت است که می‌تواند از طریق برگزاری دوره‌های آموزشی و کارگاه‌های تخصصی، ایجاد پروژه‌های on-the-job training با سایر کشورهای صاحب فناوری و روش‌های دیگر، حاصل شود. در صورت اجرای دقیق و هدفمند این مهم، می‌تواند سرعت توسعه فناوری را افزایش داد.

۸- همکاری با صنایع داخلی:

با توجه به فاصله فناوری مخابرات اپتیکی ایران و کشورهای پیشرو و همچنین شتاب توسعه در کشورهای مذکور، ایجاد ارتباط و شبکه‌سازی صحیح بین دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان و صنایع مرتبط برای تسریع فرآیندهای عملیاتی و توسعه محصول از ضرورت‌های گام‌های اول است.

۹- همکاری‌های بین‌المللی:

همانطور که ورود کشور به صنعت ماهواره با تعریف پروژه ماهواره سینا با روسیه و ماهواره مصباح با ایتالیا انجام شد، با توجه به هدف‌گذاری کلان و در نظر گرفتن شتاب رشد و توسعه این فناوری نوین، ضروری است در گام‌های نخست، پروژه‌های مشترک با همکاری با کشورهای پیشرفته در زمینه مخابرات لیزری برنامه‌ریزی شود. همینطور مشارکت فعال در کنفرانس‌ها و همایش‌های بین‌المللی در راستای تربیت نیروی انسانی کارآمد و بروز، ضروری است.

ضروری است دقت شود که کلیات این نقشه راه تنها یک پیشنهاد اولیه است و می‌تواند با توجه به شرایط و نیازهای کشور اصلاح شود. برای تدوین یک نقشه راه دقیق و عملی، لازم است ابتدا مطالعات کاملی انجام شود و نظرات کارشناسان و متخصصان مختلف در این زمینه جمع‌آوری شود. در هنگام تدوین راهبرد و نقشه راه سیاستگذار باید سوالات زیر را بدقت بررسی کرده و پاسخ دهد:

- اصلی‌ترین موانع بر سر راه توسعه فناوری ارتباطات لیزری ماهواره‌ای در ایران چیست و جهت رفع آن چه راهکارهایی وجود دارد؟
- چه منابع مالی و انسانی برای اجرای این نقشه راه مورد نیاز است؟
- چه سیاست‌های حمایتی دولت می‌تواند به توسعه این فناوری کمک کند؟
- با توجه به وضعیت کشور، همکاری با چه کشورهایی و در چه سطوحی می‌تواند مفید باشد؟

۶ نتیجه‌گیری

مخابرات اپتیکی فضای آزاد، آینده ارتباطات فضایی است. در حالی که همیشه نیاز به مخابرات RF وجود خواهد داشت، مخابرات اپتیکی امروزه قادر به پشتیبانی از بلندپروازانه‌ترین ماموریت‌های فضایی است. همانطور که در این مقاله بررسی شد، ESA این مهم را با سیستم عملیاتی رله داده اروپا اثبات کرده است. JAXA در حال توسعه سیستم رله داده اپتیکی مربوط به خود است. NASA ارتباط با کیفیت HD از ماه با ایستگاه زمینی را عملیاتی می‌کند و چین نیز ارتباط داده بالاتر از ۱۰۰ گیگابیت برثانیه از فضا را برنامه‌ریزی می‌کند. این فناوری امکان

انجام مأموریت‌های علمی و اکتشافی جدید را در سراسر منظومه شمسی فراهم می‌کند. ارتباطات نوری می‌توانند نرخ داده‌های بسیار بالاتری را نسبت به سیستم‌های مرسوم RF فراهم کنند. در حالی که ظرفیت فناوری ارتباطات رادیویی فعلی و کوتاه مدت همچنان در حال افزایش است، در نهایت با محدودیت های تخصیص پهنای باند، الزامات پاور، اندازه آنتن و قیود وزن محدود خواهد شد. امروزه بسیاری از آژانس‌های فضایی در سراسر جهان در حال سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های ارتباطات نوری در فضا و زمین هستند. همکاری در ارتباطات نوری هزینه و ریسک ماموریت را کاهش می‌دهد و احتمالاً مأموریت‌هایی را می‌سازد که در غیر این صورت توسط یک کشور به تنهایی غیرقابل تحمل هستند.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، آینده مخابرات لیزری فضایی بسیار امیدوارکننده است. با پیشرفت تکنولوژی و رفع چالش‌های موجود، می‌توان انتظار داشت که این فناوری در آینده نزدیک به طور بسیار گسترده‌ای مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی، امروزه ماندگاری در حوزه فضایی مستلزم ایجاد و توسعه زیرساخت و بررسی پتانسیل‌ها در حوزه مخابرات اپتیکی است. با توجه به چالش‌های فراوان و پیچیدگی تکنولوژیکی پیاده‌سازی و بهره‌برداری از مخابرات لیزری فضایی، ضروری است ضمن تدوین گام‌های راهبردی مشخص بر مبنای استانداردهای جهانی، نقشه راه دقیق و گام به گام ترسیم شود.

در نهایت، مطالعه حاضر به عنوان یک منبع ارزشمند برای محققان، مهندسان، سیاست‌گذاران و علاقه‌مندان به این حوزه ارائه شده است. با مطالعه این مقاله، خواننده قادر خواهد بود به درک عمیقی از پتانسیل‌ها و چالش‌های این فناوری دست یابد و نقش مهم آن را در آینده ارتباطات جهانی درک کند.

علایم و اختصارات

FSOC	Free Space Opticl Communication
RF	Radio Frequency
GOLD	Ground/Orbiter Lasercomm Demonstration
SILEX	Semiconductor laser Inter-satellite Link EXperiment
CEMERLL	Compensated Earth-Moon-Earth Retroreflector Laserlink
GEOS-II	Geodetic Earth Orbiting Satellite II
GOPEX	Galileo Optical Experiment
RME	Relay Mirror Experience
GOELITE	Geosynchronous Lightweight Technology Experiment
LEO	Low Earth Orbit
GEO	GEo-stationary Orbit
LADEE	Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer
HAP	High Altitude Platform
LOLA	
EDRS	Europian Data Relay System
FLP	Future Low-cost Platform
OSIRIS	Optical Space InfraRed downlInk System
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
LLCD	Lunar Laser Communication Demonstration
SOLISS	Small Optical Link for International Space Station
TBIRD	TeraByte InfraRed Delivery
LCRD	Laser Communications Relay Demonstration
ILLUMA-T	Integrated LCRD LEO User Modem and Amplifier Terminal
QKD	Quantum Key Distribution
AI	Artificial Inteligence
OCT	Optical Communications Terminal
SDA	Space Development Agency
ESTOL	ESA Specification for Terabit/sec Optical Links
PAT	Pointing, Acquisition and Tracking
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
HDR	High Data Rate
OICETS	Optical Interorbit Communications Engineering Test Satellite

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

[1] V. W. S. Chan, "Free-space optical communications," *J. Lightwave Technol*., vol. 24, no. 12, pp. 4750-4762, Dec. 2006.

[2] R. Vinod, S. Mutreja, "Free Space Optic Communication Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Platform, by Component, by Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2022-2031," Allied Market Research, [Online]. Available: https://www.alliedmarketresearch.com/free-space-optic-communication-market-A08077, 2023.

[3] D. L. Hutt, K. J. Snell, and P. A. Belanger, "Alexander Graham Bell's photophone," Tech. Report: Optic & Photonics News, 1993.

[4] D. Woods, Heliographs and Mirrors: from Ancient times to 21st Century, ABC-CLIO, pp.208-209, 2008.

[5] H. Kaushal, V. K. Jain, and S. Kar, Free Space Optical Communication, India, Springer, pp.4-5, 2017.

[6] J. Hecht, Beam: The race to make the laser, Tech. Report: Optics & Photonics News, 2005.

[7] B. W. H. H. R. S. B., "Atmospheric Effects on Laser Communications," *IEEE Trans*. Commun., vol. 23, no. 4, pp. 421-426, 1975.

[8] F. T. S. A. B., "Laser Communications in Space: Theoretical and Experimental Studies," *Proc. IEEE*, vol. 69, no. 12, pp. 1640-1651, Dec. 1981.

[9] G. W. G., "Propagation of Laser Beams in the Atmosphere," *Proc. IEEE*, vol. 68, no. 12, pp. 1488-1498, Dec. 1980.

[10] G. A. McGowan et al., "Free-Space Laser Communications: Principles and Practice," *IEEE J. Select. Areas Commun*., vol. 4, no. 3, pp. 167-173, 1986.

[11] W. G. D. M., "A Review of Free-Space Laser Communications Techniques," *Opt. Eng*., vol. 26, no. 1, pp. 68-75, 1987.
[12] L. C. Andrews and R. L. Phillips, Laser Beam Propagation Through Random Media, SPIE Press (Book), 1985.
[13] A. L. H., "The Effects of Atmospheric Turbulence on Laser Communications," *IEEE Trans*. Commun., vol. 30, no. 2, pp. 244-250, 1982.
[14] M. P. D., "Pointing and Tracking Techniques for Free-Space Laser Communications," *IEEE J. Select. Areas Commun*., vol. 2, no. 1, pp. 117-124, 1984.
[15] M. S. S., "free-Space Optical Communication: Recent Advances and Future Trends," *IEEE Commun. Mag*., vol. 21, no. 6, pp. 14-20, 1983.
[16] K. H. D., "Experimental Studies of Laser Communication Links in the Atmosphere," *Appl. Opt*., vol. 24, no. 8, pp. 1243-1250, 1985.
[17] F. T. S. A. B., "The Design of Laser Communications Systems for Space Applications," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst*., vol. 23, no. 4, pp. 486-491, 1987.
[18] J. P. H., "Algorithms for Pointing Control in Free-Space Laser Communication Systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol*., vol. 2, no. 1, pp. 56-63, 1989.
[19] R. V. G., "Modeling of Atmospheric Effects on Laser Communication Systems," *IEEE Trans. Commun*., vol. 36, no. 7, pp. 853-860, 1988.
[20] C. W. W., "Laser Communications in Space: An Overview of the Challenges," *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 7, pp. 825-836, 1982.
[21] E. K. L., "Free-Space Laser Communications in the Presence of Atmospheric Turbulence," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 30, no. 5, pp. 694-703, 1984.
[22] D. L. S., "Design Considerations for Free-Space Laser Communication Systems," *Opt. Eng*., vol. 27, no. 7, pp. 508-515, 1988.
[23] D. L. Fried, "Scintillation of a ground-to-space laser illuminator," *J. Opt. Soc. Am*., vol. 57, no. 8, pp. 980-983, 1967.
[24] P. O. Minott, "Scintillation in an earth-to-space propagation path," *J. Opt. Soc. Am*., vol. 62, no. 7, pp. 885-888, 1972.
[25] H. T. Yura and W. G. McKinley, "Optical scintillation statistics for IR ground-to-space laser communication systems," *Appl. Opt*., vol. 22, no. 21, pp. 3353-3358, 1983.
[26] P. J. Titterton, "Power reduction and fluctuations caused by narrow laser beam motion in the far field," *Appl. Opt*., vol. 12, no. 2, pp. 423-425, 1973.
[27] D. L. Fried, "Statistics of laser beam fade induced by pointing jitter," *Appl. Opt*., vol. 12, no. 2, pp. 422-423, 1973.
[28] J. L. Bufton, "Scintillation statistics measured in an earth-space-earth retroreflected link," *Appl. Opt*., vol. 16, no. 10, pp. 2654-2660, 1977.
[29] T. Aruga, K. Araki, T. Igarashi, F. Imai, Y. Yamamoto, and F. Sakagami, "Earth to space laser beam transmission for spacecraft attitude measurement," *Appl. Opt*., vol. 23, pp. 114-147, 1984.
[30] T. Aruga, K. Araki, R. Hayashi, T. Iwabuchi, M. Takahashi, and S. Nakamura, "Earth-to-geosynchronous satellite laser beam transmission," *Appl. Opt*., vol. 24, no. 1, pp. 53-56, 1985.
[31] K. Araki, T. Itabe, M. Takabe, T. Aruga, and H. Inomata, "Experiments on CO2 laser beam transmission from ground to geostationary meteorological satellite-III," *Laser Sensing Symposium*, pp. 47-48, 1988.
[32] I. M. Femi, Free-Space Optical Communications for Resource-Limited Small Satellites, Ph.D. thesis, Department of Electrical & Space System Engineering, The University of Kitakyushu, Japan, 2021.
[33] K. E. Wilson and J. R. Lesh, "An overview of galileo optical experiment (GOPEX)," Tech. Report: TDA progress Report 42-114, Communication Systems Research Section, NASA, 1993.
[34] M. Toyoshima, "Optical space communication in Japan," *Functional Materials*, vol. 10, no. 3, 2003.
[35] A. Carrasco-Casado, K. Shiratama et al., "NICT's versatile miniaturized lasercom terminals for moving platforms," 2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2022.
[36] A. Carrasco-Casado, R. Mata-Calvo, "Free Space optical links for space communication networks," *Springer Handbook of Optical Networks*, pp. 1075-1103, 2020.
[37] M. Toyoda, M. Toyoshima, T. Takahashi, M. Shikatani, Y. Arimoto, K. Araki, and T. Aruga, "Ground to ETS-VI narrow laser beam transmission," *Proc. SPIE*, vol. 2699, pp. 71-80, 1996.
[38] K. E. Wilson, "An overview of the GOLD experiment between the ETS-VI satellite and the table mountain facility," TDA Progress Report 42-124, *Comm. Sys. and Research Sec*., pp. 9-19, 1996.
[39] M. Jeganathan, K. E. Wilson, and J. R. Lesh, "Preliminary analysis of fluctuations in the received uplink-beacon-power data obtained from the GOLD experiments," TDA Progress Report 42-124, *Comm. Sys. and Research Sec*., pp. 20-32, 1996.
[40] K. E. Wilson, L. P. R., R. Cleis, J. Spinhirne, and R. Q. Fugate, "Results of the compensated Earth-Moon-Earth Retroreflector laser link (CEMERLL) experiments," The Telecommunication and Data Acquisition Progress Report: 42-131, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1997.
[41] T. T. Nielsen and G. Oppenhauser, "In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX," *Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. Tech*. XIV, vol. 4635, 2002.
[42] D. M. Boroson and L. Henniger, "The SILEX experiment: A new era in satellite communications," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 1, pp. 123-134, 2004.

Conference on Free-Space Laser Communications Technologies XXII, 7587, 75870D, 2010.
[57] V. Cazaubiel, G. Planche, V. Chrvalli et al., "LOLA: a 40000 km optical link between an aircraft and a geostationary satellite," International conference on space optics-ICSO 2006, Netherland, Proc. of SPIE Vol. 10567, 2006.
[58] L. Vaillon, G. Planche, V. Chorvalli, and L. Le Hors, "OPTICAL COMMUNICATIONS BETWEEN AN AIRCRAFT AND A GEO RELAY SATELLITE: DESIGN & FLIGHT RESULTS OF THE LOLA DEMONSTRATOR," *Proc. of SPIE*, vol. 10566 1056619-2, 2008.
[59] L. Vaillon, G. Planche, and P. Bernard, "From SILEX/LOLA to High data rate optical telemetry for LEO satellite," Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS 2012), 2012.
[60] G. Krieger and A. Moreira, "The ARTEMIS satellite and its role in laser communication," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 6, pp. 2345-2355, 2010.
[61] M. Toyoshima, "Trends in Laser Communications in Space," Space Japan Review, No. 70, 2010.
[62] F. Bellinne and D. E. Tonini, "Flight testing and evaluation of airborne multisensor display systems," *J. Aircraft*, vol. 7, no. 1, pp. 27-31, 1970.
[63] R. B. Deadrick and W. F. Deckelman, "Laser crosslink subsystem - An overview," *in Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. Tech*. IV, vol. 163, 1992.
[64] M. Jeganathan, A. Portillo, C. Racho, S. Lee, et al., "Lessons learnt from the Optical Communications Demonstrator (OCD)," *Proc. Of SPIE*, vol. 3615, 1999.
[65] J. Horwath, M. Knapek, B. Epple, M. Brechtelsbauer, and B. Wilkerson, "Broadband backhaul communication for stratospheric platforms: The stratospheric optical payload experiment (STROPEX)," Proc. SPIE, Free-Space Laser Comm. VI, vol. 6304, 2006.
[66] A. Biswas, D. Boroson, and B. Edwards, "Mars laser communication demonstration: What it would have been," *Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. Tech*. XVIII, vol. 6105, 2006.
[67] X. Sun, D. R. Skillman, E. D. Hoffman, D. Mao, J. F. McGarry, and R. S. Zellar, "Free-space laser communication experiment from the NASA Goddard Space Flight Center to the Lunar Reconnaissance Orbiter," *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 22, pp. 5018-5026, 2014.
[68] M. Sans, Z. Sodnik, I. Zayer, and R. Daddato, "Design of the ESA Optical Ground Station for Participation in LLCD," Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2012, 3-1, Ajaccio, Corsica, France, 2012.
[69] B. S. Robinson, D. M. Boroson, D. A. Burianek, D. V. Murphy, F. I. Khatri, et al., "The NASA Lunar Laser Communication Demonstration—Successful
[43] [43] H. Hemmati and L. Henniger, "Optical communications in space: The SILEX experience," *Opt. Express*, vol. 14, no. 25, pp. 12445-12456, 2006.
[44] R. M. Calvo, P. Beckera, D. Giggenbacha, F. Moll, et al., "Transmitter diversity verification on ARTEMIS geostationary satellite," *Proc. of SPIE*, vol. 8971 897104-1, 2014.
[45] T. TolkerNie1sen and G. Oppenhaeuser, "In Orbit test result of an Operational Optical Intersatellite Link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX," *Proc. SPIE* Vol. 4635, 2002.
[46] V. Kuzkov, Z. Sodnik, et al., "Laser Experiments with ARTEMIS Satellite in Cloudy Conditions," Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2014, S4-4, Kobe, Japan, 2014.
[47] Z. Sodnik, B. Furch, and H. Lutz, "Free-Space Laser Communication Activities in Europe: SILEX and beyond," LEOS 2006 - 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 10.1109/LEOS.2006.278845, 2006.
[48] H. Hemmati and L. Henniger, "The GeoLITE experiment: A demonstration of advanced laser communications technology in space," *Opt. Express*, vol. 13, no. 24, pp. 10022-10029, 2005.
[49] W. Cao and H. Hemmati, "Performance analysis of the GeoLITE ground-to-satellite laser communication system," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst*., vol. 42, no. 2, pp. 646-664, 2006.
[50] A. Katsuyoshi, "Overview of the optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS) project," *J. Nat. Inst. of Info and Comm. Tech*., vol. 59, pp. 5-12, 2012.
[51] S. Kraus and M. Schmitt, "High altitude platforms for telecommunications: The HAP project of DLR," *Journal of Communications and Networks*, vol. 17, no. 3, pp. 245-256, 2015.
[52] D. Giggenbach, "Lasercomm Activities at the German Aerospace Center's Institute of Communications and Navigation," *Proceedings of ICSOS 2012*, 2012.
[53] G. Krieger and A. Moreira, "The TerraSAR-X mission and system design," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 2, pp. 606-614, 2010.
[54] Y. Wang and H. Hemmati, "Inter-satellite laser communication for future space missions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 11, pp. 44-51, 2011.
[55] R. Fields, C. Lunde, R. Wonga, J. Wicker, D. Kozlowski, et al., "NFIRE-to-TerraSAR-X Laser Communication Results: Satellite Pointing, Disturbances, and Other Attributes Consistent With Successful Performance," *Proc. of SPIE*, Vol. 7330 73300Q-1, 2009.
[56] S. Kraus and M. Schmitt, "Optical inter-satellite communication between TerraSAR-X and NFIRE: The TESAT approach," Proceedings of the SPIE

Sentinel-1A in-orbit experience," 14th International Conference on Space Operations, 2016.
[82] D. Tröndle, P. M. Pimentel, C. Rochow, H. Zech, G. Muehlnikel, F. Heine, R. Meyer, S. Philipp-May, M. Lutzer, E. Benzi, P. Sivac, S. Mezzasoma, H. Hauschildt, M. Krassenburg, and I. Shurmer, "ALPHASAT – SENTINEL-1A OPTICAL INTER-SATELLITE LINKS: RUN-UP FOR THE EUROPEAN DATA RELAY SATELLITE SYSTEM," Proc. of SPIE Vol. 9739 973902-1, 2016.
[83] A. Carrasco-Casado, K. Shiratama, D. Kolev, F. Ishola, T. Fuse, H. Tsuji, and M. Toyoshima, "NICT's versatile miniaturized lasercom terminals for moving platforms," 2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2022.
[84] A. Carrasco-Casado et al., "LEO-to-ground optical communications using SOTA (Small Optical TrAnsponder) – Payload verification results and experiments on space quantum communications," Acta Astronautica, 139, 377-384, 2017.
[85] L. Zhang, C. Zhang, S. Dang, and B. Shihada, "Lessons from the commercial failure of Project Loon for 6G research roadmap design," *Front. Comms. Net.* Vol. 3, 867581, 2022.
[86] L. Nagpal and K. Samdani, "Project Loon: Innovating the connectivity worldwide," 2nd IEEE International Conference On Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology (RTEICT), 2017.
[87] P. Serrano et al., "Balloons in the Sky: Unveiling the Characteristics and Trade-offs of the Google Loon Service," IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, 2021.
[88] A. Biswas et al., "Optical payload for lasercomm science (OPALS) link validation during operations from the ISS," *Proc. of SPIE* Vol. 9354 93540F-1, 2015.
[89] B. V. Oaida et al., "Optical link design and validation testing of the Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS) system," Proc. of SPIE Vol. 8971 89710U-1, 2014.
[90] A. Dochhan et al., "13.16 Tbit/s Free-space Optical Transmission over 10.45 km for Geostationary Satellite Feeder-links," Photonic Networks; 20th ITGSymposium, pp. 1-3, 2019.
[91] Ch. Lu, Y. Cao, Ch. Peng, and J. Pan, "Micius quantum experiments in space," Rev. *Mod. Phys*. 94, 035001, 2022.
[92] L. de Forges de Parny et al., "Satellite-based quantum information networks: use cases, architecture, and roadmap," COMMUNICATIONS PHYSICS (Nature), 2023.
[93] Z. Sodnik and M. Sans, "Extending EDRS to Laser Communication from Space to Ground," Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2012.
High-Rate Laser Communications To and From the Moon," SpaceOps Conferences, Pasadena, CA, proc. Of AIAA, 2014.
[70] H. Xia, Z. Liu, Y. Chang, S. Lu, F. Fang, and J. Li, "Analysis on Development Status and Trend of Space Laser Communication Technology (in Chinese)," *Chinese Laser*, Vol. 51, Issue 11, 2024.
[71] K. ELAYOUBI, "Study of communications channels for optical links through the atmosphere," Ph.D. thesis, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2019.
[72] V. Grigoryev, V. Kovalev, V. Shargorodskiy, and V. Sumerin, "High-bit-rate Laser Space Communication Technology and Results of on-board Experiment," Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2014.
[73] D. M. Boroson, E. A. Whittaker, D. O. Caplan, and others, "Overview and Results of the Lunar Laser Communication Demonstration," Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 8971, 2014.
[74] X. Sun, D. R. Skillman, E. D. Hoffman, D. Mao, J. F. McGarry, L. McIntire, R. S. Zellar, F. M. Davidson, W. H. Fong, M. A. Krainak, G. A. Neumann, M. T. Zuber, and D. E. Smith, "Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit," *Opt. Express*, Vol. 21, Issue 2, pp. 1865-1871, 2013.
[75] M. L. Stevens, R. R. Parenti, M. M. Willis, J. A. Greco, F. I. Khatri, "The lunar laser communication demonstration time-of-flight measurement system: overview, on-orbit performance and ranging analysis," Proc. of SPIE Vol. 9739 973908-1, 2016.
[76] M. Toyoshima, Y. Takayama, T. Takahashi, K. Suzuki, S. Kimura, K. Takizawa, T. Kuri, W. Klaus, M. Toyoda, and H. Kunimori, "Ground-To-Satellite Laser Communication Experiments," 12 IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE, 2008.
[77] B. D. Owens, L. Plice, A. M. Hawkins, and L. A. Policastri, "Operating LADEE: Mission architecture, challenges, anomalies, and successes," IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2015.
[78] L. Policastri, J. Carrico, C. Nickel, and R. Lebois, "Orbit determination and acquisition for LADEE and LLCD mission operation," AAS 15-257, 2015.
[79] D. Elser, K. Günthner, I. Khan, et al., "Satellite Quantum Communication via the Alphasat Laser Communication Terminal," International Conference on Space Optical Systems and Applications (IEEE ICSOS 2015), 2015.
[80] B. Schlepp, R. Kahle, J. Saleppico, S. Kuhlmann, and U. Sterr, "Laser Communication with Alphasat - FD Challenges and First Flight Results," 24th International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD), 2014.
[81] E. Benzi, I. Shurmer, N. Policella, et al., "Optical Inter-Satellite Communication: the Alphasat and

[94] K. Böhmer et al., "Laser Communication Terminals for the European Data Relay System," Proc. of SPIE Vol. 8246 82460D-1, 2012.
[95] H. Hauschildt, S. Mezzasoma, J. Herrmann, "European Data Relay System Goes Global," IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017.
[96] D. Poncet, S. Glynn, F. Heine, "Hosting the first EDRS payload," Proc. of SPIE Vol. 10563 105630D-1, 2014.
[97] J. M. Perdigues et al., "The ESA's optical ground station for the EDRS-A LCT in-orbit test campaign: upgrades and test results," Proc. of SPIE Vol. 10562, 2016.
[98] Ch. Schmidt, M. Brechtelsbauer, F. Rein, Ch. Fuchs, "OSIRIS Payload for DLR's BiROS Satellite," Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2014.
[99] Ch. Fuchs and Ch. Schmidt, "Update on DLR's OSIRIS program," Proc. of SPIE Vol. 11180 111800I-2, 2018.
[100] N. Inaba et al., "Design concept of Quasi Zenith Satellite System," Acta Astronautica 65, 1068-1075, 2009.
[101] R. Ishibashi, "Satellite Laser Ranging Evaluation to Quasi-Zenith Satellite System," 21st International Workshop on Laser Ranging, 2018.
[102] K. S. Klemich et al., "The Flying Laptop University Satellite Mission: Ground Infrastructure and Operations After One Year in Orbit," Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 10.25967/480190, 2018.
[103] Ch. Fuchs et al., "OSIRISv1 on Flying Laptop: Measurement Results and Outlook," 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2019.
[104] J. Eikhohff, "The FLP Microsatellite Platform: flight operation manual," Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
[105] Li Rui, Lin Baojun, Liu Yingchun, Shen Yuan, Dong Mingji, Zhao Shuai, Kong Chenjie, Liu Enquan, Lin Xia, "Review on laser intersatellite link: Current status, trends, and prospects (in Chinese)," Infrared and Laser Engineering, Vol.52 No.3, 2023.
[106] P V. TRINH et al., "Experimental verification of fiber coupling characteristics for FSO downlinks from the International Space Station," Optics Express, Vol. 31, Issue 5, pp. 9081-9097, 2023.
[107] K. Iwamoto et al., "Experimental results on in-orbit technology demonstration of SOLISS," Free-Space Laser Communications XXXIII, vol. 11678, pp. 51-57. doi: 10.1117/12.2578089, 2021.
[108] JAXA, "JAXA | Small Optical Link for International Space Station (SOLISS) Succeeds in Bidirectional Laser Communication Between Space and Ground Station," JAXA | Japan Aerospace Exploration Agency. https://global.jaxa.jp/press/2020/04/20200423-1_e.html (accessed Nov. 2024).
[109] Goddard Space Flight Center, (NASA), Tech. Report, "Laser communications relay demonstration: The next step in optical communications," Doc ID: FS-2021-4-658-GSFC https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/07/lcrd-fact-sheet.pdf (accessed Nov. 2024).
[110] J. Mitchell, "2022 NASA Optical Communications Update," Directed Energy Symposium National Harbor, 2022.
[111] Z. Yongliao et al., "Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission," Advances in Space Research 67 (2021) 812-823, 2021.
[112] Sh. Liao et al., "Space-to-Ground Quantum Key Distribution Using a Small-Sized Payload on Tiangong-2 Space Lab," CHIN. PHYS. LETT. Vol. 34, No. 9 (2017) 090302, 2017.
[113] B. Rödiger, Ch. Schmidt, "IN-ORBIT DEMONSTRATION OF THE WORLD'S SMALLEST LASER COMMNUNICATION TERMINAL – OSIRIS4CUBESAT / CUBELCT," The 4S Symposium 2024, 2024.
[114] C. M. Schieler et al., "On-orbit demonstration of 200-Gbps laser communication downlink from the TBIRD CubeSat," SPIE Proceeding, Free-Space Laser Communications XXXV, 2023.
[115] K. Riesing et al., "Operations and Results from the 200 Gbps TBIRD Laser Communication Mission," 37th Annual Small Satellite Conference, 2024.
[116] NASA, "TBIRD Fact Sheet," https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/10/tbird_fact_sheet_v2.pdf?emrc=e8317f (accessed Nov. 2024).
[117] NASA, "NASA's Record-Breaking Laser Demo Completes Mission," NASA's Record-Breaking Laser Demo Completes Mission - NASA (accessed Nov. 2024).
[118] NASA, "ILLUMA-T fact sheet," National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, https://tempo.gsfc.nasa.gov/static-files/ILLUMA-T%20Fact%20Sheet.pdf (accessed Nov. 2024).
[119] A. Seas et al., "Optical Communications Systems for NASA's Human Space Flight Missions," Proc. of SPIE Vol. 11180 111800H-2, 2018.
[120] D J Israel et al., "Early results from NASA's laser communications relay demonstration (LCRD) experiment program," Proceedings Volume 12413, Free-Space Laser Communications XXXV; 1241303 (2023), 2023.
[121] F. I. Khatri et al., "Space-to-Ground Optical Interface Verification for the Orion Artemis II Optical (O2O) Communications Demonstration," IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), https://doi.org/10.1109/ICSOS59710.2023.10491223, 2023.

[122] R. Rogalin, "The Optical to Orion Time of Flight Ground Processing System," 2023 IEEE Aerospace Conference, 2023.
[123] Ch. Gramling et al., "LunaNet: Interoperability for Lunar PNT," International Committee on GNSS, 2023.
[124] D. J. Israel et al., "LunaNet: a Flexible and Extensible Lunar Exploration Communications and Navigation Infrastructure," 2020 IEEE Aerospace Conference, https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172509, 2020.
[125] G. Tiwari and R. C. S. Chauhan, "A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication," INDIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol 13(06), 712 – 724, 2020.
[126] O. Zhu, H. Tao, Y. Cao and X. Li, "Laser Inter-Satellite Link Visibility and Topology Optimization for Mega Constellation," Electronics 2022, 11, 2232, 2022.
[127] N. Bello et al., "Performance Test of Spacex's Starlink: An Empirical Review," JES, Vol. 52, No. 5, 2024.
[128] S. P. K. SARKER AND A. HOSSAIN, "Analysis of inter-satellite optical wireless communication systems for enhanced data transmission in satellite constellations," Vol. 3, No. 7 / Optics Continuum, 2024.
[129] A. Carrasco-Casado et al., "Miniaturized Multi-Platform Free-Space Laser-Communication Terminals for Beyond-5G Networks and Space Applications," Photonics 2024, 11, 545. https://doi.org/10.3390/photonics11060545, 2024.
[130] Y. Zheng, "An overview of communication and orbital composition technologies based on starlink LEO satellite constellation from a technical perspective," Proceedings of the 2nd International Conference on Computing Innovation and Applied Physics DOI: 10.54254/2753-8818/18/20230411, 2023.
[131] M. Krischke, "Mynaric Annual Report," Mynaric Co. Ltd., 2021.
[132] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 1, pp. 1 380-404, 2017.
[133] Y. Li, Q. Zhang, and J. Wang, "High-speed optical modulation for free-space optical communication," Journal of Lightwave Technology, vol. 35, no. 3, pp. 456-470, 2017.
[134] J. Wang, Y. Zhang, and Z. Wang, "Advances in laser communication systems for deep space exploration," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 3, pp. 1823-1848, 2018.
[135] L. Yang, X. Chen, and J. Liu, "Design and analysis of a high-precision laser communication terminal for deep space exploration," Optics Express, vol. 27, no. 10, pp. 14222-14233, 2019.
[136] Y. Shi, X. Liu, and J. Zhang, "High-performance avalanche photodiode for free-space optical communication," Optics Letters, vol. 45, no. 12, pp. 2901-2904, 2020.
[137] Z. Chen, J. Wang, and Y. Li, "Adaptive optics for free-space optical communication systems: A review," Optics and Laser Technology, vol. 109, pp. 105-117, 2018.
[138] Y. Liu, Q. Zhang, and J. Wang, "Atmospheric turbulence mitigation techniques for free-space optical communication," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 2, pp. 1172-1192, 2019.
[139] L. Xu, Y. Li, and Z. Chen, "Security of free-space optical communication systems: A review," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 1, pp. 437-463, 2021.
[140] T. Wei, W. Feng, Y. Chen, C.-X. Wang, N. Ge, and J. Lu, "Hybrid Satellite-Terrestrial Communication Networks for the Maritime Internet of Things: Key Technologies, Opportunities, and Challenges," IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 11, pp. 8910-8934, 2021.
[141] S. Hall, "A Survey of Free Space Optical Communications in satellites," in Space Optical Systems and Applications, pp. 107-118, Springer, 2020.
[142] Y. Kaymak, M. Yuksel, and M. Sahin, "A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 2, pp. 1104-1123, 2019.
[143] Toyoshima, M., "Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications [Invited]," Journal of Optical Networking, vol. 1 4, no. 6, pp. 767-782, 2005.
[144] Fu, W., "Analysis of Optical Satellite Communication Technology and Its Development Trend," in *2022 12th International Conference on Social Science and Humanities (STEHF 2022)*, Shanghai, China, 2022, pp. 1-6.
[145] Space Development Agency (SDA), "Draft as issued for Transport Layer T0 RFP HQ085020R0001," Office of the Under Secretary of Defense, 2020.
[146] Space Development Agency (SDA), "Optical Communications Terminal (OCT) Standard Version 3.1.0," Office of the Under Secretary of Defense, 2023.
[147] Space Development Agency (SDA), "Optical Communications Terminal Standard Version 4.0.0," Office of the Under Secretary of Defense, 2024.
[148] CCSDS Secretariat, "Optical High Data Rate (HDR) Communication-1064 nm," CCSDS 141.11-o-1 (Orange book), Issue 1, 2018.
[149] B. L. Edwards, R. Daddato, K.-J. Schulz, et al., "An Update on the CCSDS Optical Communications

Working Group Interoperability Standards," 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), pp. 1-8, 2019.
[150] ESA and Industry of ESA member states, "ESA SPECIFICATION FOR TERABIT/SEC OPTICAL LINKS (ESTOL)," ESA-CSC-T-SP-0001, 2023.
[151] K.-J. Schulz, "CCSDS Standardisation in Optical Communication," SkyLight Industry Day, 2017.
[152] CCSDS Secretariat, "OPTICAL COMMUNICATIONS physical layer," CCSDS 141.0-B-1 (Blue book), Issue 1, 2019.
[153] CCSDS Secretariat, "OPTICAL COMMUNICATIONS CODING AND SYNCHRONIZATION," CCSDS 142.0-B-1 (Blue book), Issue 1, 2019.
[154] CCSDS Secretariat, "REAL-TIME WEATHER AND ATMOSPHERIC CHARACTERIZATION DATA," CCSDS 140.1-G-2 (Green book), Issue 2, 2024.
[155] CCSDS Secretariat, "OPTICAL HIGH DATA RATE (HDR) COMMUNICATION— 1550 NM," CCSDS 141.10-O-1 (Orange book), Issue 1, 2022.
[156] CCSDS Secretariat, "OVERVIEW OF SPACE COMMUNICATIONS PROTOCOLS," CCSDS 130.0-G-4 (Green book), Issue 4, 2023.
[157] CCSDS Secretariat, "ATMOSPHERIC CHARACTERIZATION AND FORECASTING FOR OPTICAL LINK OPERATIONS," CCSDS 141.1-M-1 (Magneta book), Issue 1, 2022.
[158] M. Toyoda, M. Toyoshima, T. Takahashi, M. Shikatani, Y. Arimoto, K. Araki, and T. Aruga, "Ground to ETS-VI narrow laser beam transmission," in SPIE, vol. 2699, pp. 71-80, 1996
[159] K. E. Wilson, "An overview of the GOLD experiment between the ETS-VI satellite and the table mountain facility," TDA Progress Report 42-124, Comm. Sys. and Research Sec., pp. 9-19, 1996.
[160] K. Nakamaru, K. Kondo, T. Katagi, H. Kitahara, and M. Tanaka, "An overview of Japan's Engineering Test Satellite VI (ETS-VI) project," in Proc. IEEE, Communications, Int. Conf. on World Prosperity Through Comm., vol. 3, (Boston, MA), pp. 1582 – 1586, 1989.
[161] M. Toyoshima and Y. Takayama, "Demonstrations on Space Laser Communications in Japan," QUNAT 2012 in IPAM, UCLA, U.S., 2012.
[162] M. Toyoshima and A. Carrasco-Casado, "NICT's optical communication projects and ground station development," KISS Workshop: Beckman Institute Auditorium, 2016.
[163] A. Carrasco-Casado et al., "Intersatellite-link demonstration mission between CubeSOTA (LEO CubeSat) and ETS9-HICALI (GEO satellite)," IEEE 978-1-7281-0500-0, 2019.
[164] Y. Fujiwara et al., "Optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS)," Acta Astronautica, vol.61, no. 1-6, pp. 163-175, 2007.
[165] T. Jono, "Optical Inter-orbit Communication Experiment between OICETS and ARTEMIS.", Journal of the National Institute of Information and Communications Technology Vol. 59 Nos. 1/2, 2012
[166] M. Naoe, "Overview of the Small Optical TrAnsponder_SOTA_Project, National Institute of Information and Communications Technology," ITEJ, vol. 63, no. 6, pp. 780-783, 2009.
[167] T. Tanaka, Y. Kawamura, and T. Tanaka, "Development and operations of nano-satellite FITSAT-1 (NIWAKA)," Acta Astronautica, vol. 107, pp. 112-129, 2015.
[168] H. Takenaka, A. Carrasco-Casado, M. Fujiwara, M. Kitamura, M. Sasaki, and M. Toyoshima, "Satellite-to-ground quantum-limited communication using a 50-kg-class microsatellite," Nature Photon, vol. 11, no. 8, pp. 502-508, 2017.
[169] A. Carrasco-Casado et al., "LEO-to-ground polarization measurements aiming for space QKD using Small Optical TrAnsponder (SOTA)," Opt. Express, OE, vol. 24, no. 11, pp. 12254-12266, 2016.
[170] H. Kunimori, H. Takenaka, T. Kubo-oka, T. Fuse, M. Toyoshima, H. Tomio, S. Fujita, and T. Kuwahara, "Preliminary Results of Very Small Optical Transmitter (VSOTA) on Microsatellite RISESAT," IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2019.
[171] D. R. KOLEV and M. TOYOSHIMA, "Satellite-to-ground optical communications using small optical transponder (SOTA) – received-power fluctuations," Opt. Express, OE, vol. 25, no. 23, pp. 28319-28329, 2017.
[172] C. Kilic, "Quasi-Zenith Satellite Systems Technical Literature Review," West Virginia University, 2015.
[173] JAXA, "The Japanese Japanese Quasi - Zenith Satellite Satellite System Program Program Updates Updates and Current Currentstatus," Fifth International International Committee on GNSS, Unoosa, 2010.
[174] H. Komatsu et al., "In-orbit experimental architecture design of bi-directional communication with a small optical communication terminal attached on ISS and an optical ground station," Free-Space Laser Communications XXXII, San Francisco, United States, 2020.
[175] SOI Shhinobu, "JAXA strategy of JEM/EF utilization and Extension of CALET mission," https://indico.cern.ch/event/881545/contributions/3719508/attachments/1980232/3297378/20200203_CALET_TIM_JAXA-RevB.pdf, 2020.
[176] T. Kubo-oka et al., "Development of 'HICALI': high speed optical feeder link system between GEO and ground," International Conference on Space Optics — ICSO 2018, vol. 11180, pp. 2158-2165, 2019.
[177] JAXA, "Optical (HICALI) Satellite Communication System," Virtual Exhibition Room, https://www2.nict.go.jp/wireless/en/i_hicali.html, 2024.
[178] A. Biswas, K. E. Wilson, and N. A. Page, "Lasercom Test and Evaluation Station (LTES)

[192] D. J. Israel, B. L. Edwards, R. L. Butler, J. D. Moores, and S. Piazzolla, "Early Results from the LCRD Experiment Program," in SPIE proceeding Vol. 12413, 2023.
[193] D. Ryan, "NASA's Space Station Laser Comm Terminal Achieves First Link," NASA, Nov. 1, 2023. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/technology/space-comms/nasas-space-station-laser-comm-terminal-achieves-first-link/
[194] NASA JPL, "Psyche Fact Sheet," NASA, Sep. 1, 2023. [Online]. Available: https://smd-cms.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/09/psyche-fact-sheet-09012023-3.pdf
[195] NASA JPL, "NASA's Optical Comms Demo Transmits Data Over 140 Million Miles," NASA, Apr. 25, 2024. [Online]. Available: https://psyche.asu.edu/2024/04/25/nasas-optical-comms-demo-transmits-data-over-140-million-miles/
[196] NASA JPL, "NASA to Demonstrate Laser Communications from Space Station," NASA. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/technology/nasa-to-demonstrate-laser-communications-from-space-station/
[197] NASA JPL, "LASERS LIGHT THE WAY: LASER COMMUNICATIONS MISSIONS," NASA, May 2021. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2021/05/optical_comm_roadmap_508.pdf (accessed Nov. 20, 2024)
[198] J. M. Perdigues, et al., "The ESA's optical ground station for the EDRS-A LCT in-orbit test campaign: upgrades and test results," in International Conference on Space Optics — ICSO 2016, vol. 10562, pp. 833–841, 2017.
[199] R. Fields, et al., "5.625 Gbps bidirectional laser communications measurements between the NFIRE satellite and an Optical Ground Station," in International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), pp. 44–53, 2011.
[200] B. Gütlich, R. Meyer, S. Phillip-May, and A. Pagels-Kerp, "German Roadmap on Optical Communication in Space," in Advanced Solid-State Lasers Congress, Paris, 2013, p. LM1B.2.
[201] D. Schulze, J. Herman, and S. Löw, "Formation Flight in Low-Earth-Orbit at 150 m AOCS In-Orbit Experience," AIAA proceedings, 2012, doi: 10.2514/6.2010-2375.
[202] W. Griethe, M. Gregory, F. Heine, and H. Kämpfner, "ADVANCED BROADBAND LINKS FOR TIER III UAV DATA COMMUNICATION," DASIA 2011 San Anton, Malta, 2011.
[203] I. Shurmer, F. Marchese, J.-M. Morales-Santiago, and P. P. Emanuelli, "Sentinels Optical Communications Payload (OCP) Operations: From Test to In-Flight Experience," 2018 SpaceOps Conference, Marseille, France, 2018.
development: an update," Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1998.
[179] C. E. DeVoe et al., "Optical overview and qualification of the LLCD space terminal," International Conference on Space Optics — ICSO 2014, vol. 10563, p. 105630F, 2014.
[180] A. Biswas, S. Piazzolla, B. Moision, and D. Lisman, "Evaluation of deep-space laser communication under different mission scenarios," San Francisco, California, United States, p. 82460W, 2012.
[181] D. M. Cornwell, "NASA's optical communications program for 2015 and beyond," San Francisco, California, United States, p. 93540E, 2015.
[182] Z. Sodnik et al., "Results from a Lunar Laser Communication Experiment between NASA's LADEE Satellite and ESA's Optical Ground Station," International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2014, Kobe, Japan, 2014.
[183] M. V. D'Ortenzio, J. L. Bresina, A. R. Crocker, R. C. Elphic, K. F. Galal, and D. R. Hunt, "Operating LADEE: Mission Architecture, Challenges, Anomalies, and Successes," 2015 IEEE Aerospace Conference, pp. 1-10, 2015.
[184] NASA, "LADEE Fact Sheet," NASA, 2013.
[185] A. Biswas, B. Oaida, K. S. Andrews, J. M. Kovalik, M. Abrahamson, and M. W. Wright, "Optical payload for lasercomm science (OPALS) link validation during operations from the ISS," Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII, vol. 9354, pp. 123-132, 2015.
[186] B. V. Oaida, M. J. Abrahamson, R. J. Witoff, J. N. Bowles Martinez, and D. A. Zayas, "OPALS: An optical communications technology demonstration from the International Space Station," in 2013 IEEE Aerospace Conference, 2013, pp. 1-6. doi: 10.1109/AERO.2013.6497167
[187] M. Selinger, "Demonstrating laser comms," Aerospace America, vol. 52, no. 9, pp. 20-22, Sep. 2014.
[188] M. J. Abrahamson, B. V. Oaida, O. Sindiy, and A. Biswas, "Achieving operational two-way laser acquisition for OPALS payload on the International Space Station," Proc. of SPIE, vol. 9354, 2015, Art. no. 935408-1.
[189] K. Cahoy, P. Grenfell, A. Crews, M. Longa, et al., "The CubeSat Laser Infrared CrosslinK Mission (CLICK)," in ICSO 2018, Proc. of SPIE Vol. 11180, 2018, Art. no. 111800Y-2.
[190] D. Rowen, S. Janson, C. Coffman, R. Welle, D. Hinkley, B. Hardy, and J. Gangestad, "The NASA Optical Communications and Sensor Demonstration Program: Proximity Operations," in 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2018.
[191] S. Janson, R. Welle, T. Rose, et al., "The NASA optical communications and sensor demonstration program: initial flight results," in 29th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2016.

of the European Data Relay System is in orbit," Acta Astronautica, vol. 177, pp. 537–544, 2020.
[216] D. Giggenbach, "Mobile Optical Communication projects at DLR and prospects on future developments," BroadSky Workshop, in conjunction with the 13th Ka and Broadband Communications Conference, Turin, Italy, 2007.
[217] D. Giggenbach, F. Moll, S. Parthasarathy, and B. Belabbas, "Optical High Speed Communications for HAPS," HAPS4ESA Workshop 2019, 2019.
[218] F. Moll, J. Horwath, A. Shrestha, M. Brechtelsbauer, C. Fuchs, L. M. Navajas, A. L. Souto, and D. D. Gonzalez, "Demonstration of high-rate laser communications from a fast airborne platform," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 9, pp. 1985-1995, doi: 10.1109/JSAC.2015.2433054, 2015.
[219] J. Horwath and C. Fuchs, "Aircraft to Ground Unidirectional Laser-Comm. Terminal for High Resolution Sensors," Proc. of SPIE, vol. 7199, no. 719909-1, 2009.
[220] B. Rödiger et al., "DLR'S SOLUTIONS FOR OPTICAL COMMUNICATIONS ON CUBESATS," Institute of Communications and Navigation German Aerospace Center (DLR), [Online]. Available: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/09/20230913-osl-overview.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[221] J. Poliak, R. M. Calvo, and F. Rein, "Demonstration of 1.72 Tbit/s optical data transmission under worst-case turbulence conditions for ground-to-geostationary satellite communications," IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 9, pp. 1863-1866, 2018.
[222] D. Giggenbach, J. Poliak, R. Mata-Calvo, C. Fuchs, N. Perlot, R. Freund, and T. Richter, "Preliminary Results of Terabit-per-second Long-Range Free-Space Optical Transmission Experiment THRUST," Proc. of SPIE, vol. 9647, no. 21, 2015.
[223] DLR, "Higher data rates and own alignment unit," [Online]. Available: https://www.dlr.de/en/kn/research-transfer/projects/osiris-optical-communication-in-space/osirisv3 (accessed Nov. 20, 2024).
[224] DLR, "OSIRIS - Optical Communication in Space," [Online]. Available: https://www.dlr.de/en/kn/research-transfer/projects/osiris-optical-communication-in-space (accessed Nov. 20, 2024).
[225] Z. Liu, Q. Jiang, K. Zhao, X. Liu, W. Ma, et al., "Analysis of Reliable Transmission Performance Optimization Methods for Satellite-to-Ground Laser Communication Links," Igminresearch, vol. 2, no. 7, 2024.
[226] QSS (QUESS, Mozi, Micius), [Online]. Available: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/qss.htm (accessed Nov. 20, 2024).
[227] Z. Yongliao, Z. Yan, B. Yunfei, W. Lianguo, et al., "Scientific objectives and payloads of Tianwen-1,
[204] H. Zech, F. Heine, and M. Motzigemba, "Laser Communication Terminals for Data Relay Applications: Todays Status and Future Developments," IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2017, 2017.
[205] T. Göttfert, B. Grishechkin, M. T. Wörle, and C. Lenzen, "The Link Management System for the European Data Relay System," in 14th International Conference on Space Operations, SpaceOps 2016, AIAA 2016-2645, Session: PS - Mission Planning Systems III, 2016.
[206] G. Berretta, A. De Agostini, and A. Dickinson, "The European Data Relay System: Present and Future Evolution," Proceedings of the IEEE, vol. 78, no. 7, pp. 1115-1121, 1990.
[207] M. Witting, H. Hauschildt, A. Murrell, et al., "Status of the European Data Relay Satellite System," in Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2012.
[208] L. Bacsardia, R. Birkeland, A. Hornig, S. Mansoor, B. Morrison, and Y. Tsodikovich, "The current state and the future of Space Internet - the Space Generation Perspective," 67th International Astronautical Congress - IAC2016, 2016.
[209] ESA, "EUROPEAN DATA RELAY SATELLITE SYSTEM (EDRS) OVERVIEW," ESA, [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/EDRS/Overview (accessed Nov. 20, 2024)
[210] ESA, " EDRS-A and its laser are ready to fly (2015, December 9)," ESA, [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/EDRS/EDRS-A_and_its_laser_are_ready_to_fly(accessed Nov. 20, 2024)
[211] F. Wallrapp, R. Ballweg, and Y. Gataullin, "THE EUROPEAN DATA RELAY SYSTEM (EDRS): OPERATIONAL CHALLENGES," 62nd International Astronautical Congress, Cape Town, SA, 2011.
[212] H. Hauschildt, F. Garat, H. Greus, et al., "European Data Relay System – one year to go!," Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2014.
[213] J.-C. Scharringhausena and J. Seelmann, "The evolution of the EDRS control centre for automated operations of EDRS-C," 16th International Conference on Space Operations, Cape Town, South Africa, 2021.
[214] G. Rossmanitha, S. Bernonvilleb, A. Kolbeckc, J. Scharringhausend, and M. Schmidhuber, "The EDRS mission and its operational experiences to date from GSOC perspective," 17th International Conference on Space Operations, Dubai, United Arab Emirates, 2023.
[215] D. Calzolaio, F. Curreli, J. Duncan, A. Moorhouse, G. Perez, and S. Voegt, "EDRS-C – The second node

China’s first Mars exploration mission," Advances in Space Research, vol. 67, no. 4, pp. 812-823, 2021.
[228] ISS: BTLS (OnBoard Terminal of a Laser Communication System), [Online]. Available: https://www.eoportal.org/other-space-activities/iss-btls#launch (accessed Nov. 20, 2024).
[229] Mynaric, "Mynaric Selected for Phase 2 of DARPA Space-BACN Program," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-selected-for-phase-2-of-darpa-space-bacn-program/ (accessed Nov. 20, 2024).
[230] Mynaric, " Mynaric delivers CONDOR Mk2 terminals to Telesat Government Solutions for DARPA’s Blackjack program," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-delivers-condor-mk2-terminals-to-telesat-government-solutions-for-darpas-blackjack-program/(accessed Nov. 20, 2024).
[231] Mynaric, "Mynaric selected for next phase of DARPA program," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-selected-for-next-phase-of-darpa-program/ (accessed Nov. 20, 2024).
[232] R. Li, B. Lin, Y. Liu, M. Dong, and S. Zhao, "A Survey on Laser Space Network: Terminals, Links, and Architectures," IEEE Access, vol. 10, pp. 15085-15103, 2022.
[233] J. Bayol, "Space Optical Communications: Why Are Space-to-ground Links Taking Time to Develop?," Calia Labs, [Online]. Available: https://www.cailabs.com/blog/aerospace-and-defense/space-optical-communications-why-are-space-to-ground-links-taking-time-to-develop/ (accessed Nov. 20, 2024).
[234] Mynaric, "SpaceLink and Mynaric join forces; sign term sheet onhttps://mynaric.com/news/spacelink-and-mynaric-join-forces-sign-term-sheet-on-sale-of-laser-communication-products-and-expansion-of-product-portfolio/ (accessed Nov. 20, 2024).
[235] Mynaric, "Mynaric Signs Multi-Million Dollar Deal with Spacelink," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-signs-multi-million-dollar-deal-with-spacelink/ (accessed Nov. 20, 2024).
[236] Mynaric, "Mynaric announces another customer for recently released CONDOR Mkhttps://mynaric.com/news/mynaric-announces-another-customer-for-recently-released-condor-mk3/ (accessed Nov. 20, 2024).
[237] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, "LASER INTERSATELLITE LINKS IN A STARLINK CONSTELLATION," IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY MAGAZINE, 2021.
[238] P. Kawade, "SpaceX’s entry into the optical satcom terminal market could be a game-changer," Analysis mason, 2024.
[239] AAC Clyde Space, "CubeCAT Laser Communication Module," [Online]. Available: https://www.aac-clyde.space/what-we-do/space-products-components/communications/cubecat (accessed Nov. 20, 2024).
[240] Mynaric, "Future market laser-based communications network offers enormous growth potential," [Online]. Available: https://mynaric.com/wp-content/uploads/2018/03/20180110_Mynaric_GBC_research_ENG.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[241] Mynaric, "The market for laser-based communication networks offers enormous growth potential and is starting to gain momentum," [Online]. Available: https://mynaric.com/wp-content/uploads/2019/01/17475.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[242] J. Horwath et al., "Test results of error-free bidirectional 10 Gbps link for air-to-ground optical communications," in Proceedings Volume 10524, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXX; 105241F, 2018.
[243] TESAT, "TESAT 1970," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesat-Spacecom (accessed Nov. 20, 2024).
[244] TESAT, "TESAT overview," [Online]. Available: https://www.tesat.de/company (accessed Nov. 20, 2024).
[245] TESAT, "TESAT Products," [Online]. Available: https://www.tesat.de/products (accessed Nov. 20, 2024).
[246] M. Motzigemba, "LASER COMMUNICATION IN SPACE," EPIC Forum 2021, 2021.
[247] N. Höpcke, "OPTICAL COMMUNICATION TERMINALS IN SPACE 2022," EPIC Photonics, [Online]. Available: https://epic-photonics.com/wp-content/uploads/2022/04/4.1-Nils-Hoepcke TESAT_public_sharable-on-website.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[248] TESAT, "SCOT135 LCT datasheet," [Online]. Available: https://www.tesat.de/images/tesat/products/240306_DataSheet_SCOT135_A4.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[249] TESAT, "SCOT80 LCT datasheet," [Online]. Available: https://www.tesat.de/images/tesat/products/240306_DataSheet_SCOT80_A4_Druck.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[250] TESAT, "LCT 135 datasheet," [Online]. Available: https://www.tesat.de/images/tesat/products/220607_DataSheet_LCT135_A4.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[251] TESAT, "TOSIRIS datasheet," SatCatalog, [Online]. Available: https://satcatalog.s3.amazonaws.com/components/572/SatCatalog_-Tesat-Spacecom-TOSIRIS-_Datasheet.pdf?lastmod=20210803065150 (accessed Nov. 20, 2024).
[252] TESAT, "SMARTLCT70," [Online]. Available: https://www.tesat.de/images/tesat/products/220607_D

transport-layer-beta-program/ (accessed Nov. 20, 2024).
[263] Mynaric, "Mynaric selected by German government for multiple projects to develop quantum communication capabilities," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-selected-by-german-government-for-multiple-projects-to-develop-quantum-communication-capabilities/ (accessed Nov. 20, 2024).
[264] Mynaric, "Mynaric selected by ESA to investigate optical technologies for next generation high-throughput optical inter-satellite links," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-selected-by-esa-to-investigate-optical-technologies-for-next-generation-high-throughput-optical-inter-satellite-links/ (accessed Nov. 20, 2024).
[265] Mynaric, "Mynaric selected by Raytheon Technologies to supply optical communications terminals for SDA Tranche 1 Tracking Layer program," [Online]. Available: [https://mynaric.com/news/mynaric-selected-by-raytheon-technologies-to-supply-optical-communications-terminals-for-sda-tranche-1-tracking-layer-program/](accessed Nov. 20, 2024)
[266] Mynaric, "Mynaric Overview," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Mynaric (accessed Nov. 20, 2024).
[267] R. Jewett, "Latest Starlink Satellites Equipped with Laser Communications, Musk Confirms," Satellite Today, Jan. 25, 2021. [Online]. Available: https://www.satellitetoday.com/launch/2021/01/25/latest-starlink-satellites-equipped-with-laser-communications-musk-confirms/ (accessed Nov. 20, 2024).
[268] L. Grush, "With latest Starlink launch, SpaceX touts 100 Mbps download speeds and ‘space lasers’," The Verge, Sep. 3, 2020. [Online]. Available: https://www.theverge.com/2020/9/3/21419841/spacex-starlink-internet-satellite-constellation-download-speeds-space-lasers (accessed Nov. 20, 2024).
[269] [268] Mynaric, "Mynaric Signs Memorandum of Understanding (MoU) to Accelerate Entrance to Indian Aerospace Market," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-signs-memorandum-of-understanding-mou-to-accelerate-entrance-to-indian-aerospace-market/ (accessed Nov. 20, 2024).
[270] Mynaric, "Mynaric and Cloud Constellation Partner Up and Sign MoU on SpaceBelt – Cloud Constellation’s LEO Network for Space-based Secure Cloud Data Storage," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-and-cloud-constellation-partner-up-and-sign-mou-on-spacebelt-cloud-constellations-leo-network-for-space-based-secure-cloud-data-storage/ (accessed Nov. 20, 2024).
[271] Mynaric, "Mynaric Laser Communication products in Space," [Online]. Available: ataSheet_SmartLCT70_A4.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[253] TESAT, "ConLCT80 datasheet," SatSearch, [Online]. Available: https://satsearch.co/products/tesat-conlct80-laser-communication-terminal-for-broadband-constellations (accessed Nov. 20, 2024).
[254] TESAT, "TESAT'S CONLCT MODEM SUCCESSFULLY DEMONSTRATES SDA LASER COMMUNICATION STANDARD," [Online]. Available: https://www.tesat.de/news/press/921-tesat-s-conlct-modem-successfully-demonstrates-sda-laser-communication-standard (accessed Nov. 20, 2024).
[255] TESAT, "CubeLCT100 datasheet," SatSearch, [Online]. Available: https://satsearch.co/products/tesat-cubelct (accessed Nov. 20, 2024).
[256] TESAT, "SCOT20 datasheet," [Online]. Available: https://www.tesat.de/images/tesat/products/240306_DataSheet_SCOT20_A4_Druck.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[257] Mynaric, "ReOrbit selects Mynaric’s CONDOR Mk3 for Space-to-Space and Space-to-Ground Laser Communications Demonstration," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/reorbit-selects-mynarics-condor-mk3-for-space-to-space-and-space-to-ground-laser-communications-demonstration/ (accessed Nov. 20, 2024).
[258] Mynaric, "Mynaric Advances Production of CONDOR Mk3," [Online]. Available: [https://mynaric.com/news/mynaric-advances-production-of-condor-mk3/](accessed Nov. 20, 2024)
[259] Mynaric, "Mynaric receives order from Loft Federal for CONDOR Mk3 optical communications terminals to support NExT – SDA’s Experimental Testbed," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-receives-order-from-loft%e2%80%8b-federal%e2%80%8b-for-condor-mk3-optical-communications-terminals-to-support-next-sdas-experimental-testbed/ (accessed Nov. 20, 2024).
[260] Mynaric, "Mynaric Announces Preliminary Full-Year 2023 Results and Provides Outlook for Full-Year 2024," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-announces-preliminary-full-year-2023-results-and-provides-outlook-for-full-year-2024/ (accessed Nov. 20, 2024).
[261] Mynaric, "Mynaric signs order from WARPSPACE for CONDOR terminals and marks first sale in Japanese space industry," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-signs-order-from-warpspace-for-condor-terminals-and-marks-first-sale-in-japanese-space-industry/ (accessed Nov. 20, 2024).
[262] Mynaric, "Mynaric selected by Rocket Lab for Space Development Agency’s Tranche 2 Transport Layer – Beta Program," [Online]. Available: https://mynaric.com/news/mynaric-selected-by-rocket-lab-for-space-development-agencys-tranche-2-

https://mynaric.com/products/space/ (accessed Nov. 20, 2024).
[272] Mynaric, "CONDOR Mk2 datasheet," SatNow, [Online]. Available: https://www.satnow.com/products/laser-communication-terminals/mynaric/155-1475-condor-mk2 (accessed Nov. 20, 2024).
[273] Mynaric, "CONDOR Mk3 datasheet," SatNow, [Online]. Available: https://www.satnow.com/products/laser-communication-terminals/mynaric/155-1475-condor-mk3 (accessed Nov. 20, 2024).
[274] P. Hyvönen, A. Vidmark, L. Francou, and G. Baister, "On-board Terminal Developments and Operations of Optical Ground Networks for Small Satellites," 2018 SpaceOps Conference, 2018.
[275] Space micro, "Space micro µLCT SINGLE APERTURE OHA datasheet," [Online]. Available: https://www.spacemicro.com/products/communication-systems/%CE%BCLCT%E2%84%A2%20LASER%20COMMUNICATION%20TERMINAL.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[276] Space micro, "Space micro µLCT dual APERTURE OHA datasheet," [Online]. Available: https://www.spacemicro.com/products/communication-systems/%CE%BCLCT%E2%84%A2100%20LASER%20COMMUNICATION%20TERMINAL.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[277] Space micro, "Space micro µLCT dual APERTURE OHA datasheet," [Online]. Available: https://www.spacemicro.com/products/communication-systems/%CE%BCLCT%E2%84%A2100%20LASER%20COMMUNICATION%20TERMINAL.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[278] Astrogate Labs, "ASTRO-LINK datasheet," [Online]. Available: https://astrogatelabs.com/ (accessed Nov. 20, 2024).
[279] Astrolight Space, "ATLAS-1 datasheet," [Online]. Available: https://astrolightspace.com/atlas/ (accessed Nov. 20, 2024).
[280] General Atomics, "General Atomics OPTICAL COMMUNICATIONS," [Online]. Available: https://www.ga.com/space-systems/pdf/Optical-Communications.pdf (accessed Nov. 20, 2024).
[281] MOSTCOM, "MOSTCOM space terminal products," [Online]. Available: https://moctkom.ru/space-terminals/ (accessed Nov. 20, 2024).

COPYRIGHTS
© 2025 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)