



Advancing Free-Space Optical Communication: A Global Comparative Analysis of Standards and Future Technological Directions

Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 6, No. 1, pp.: 21-35
2026

DOI:

[10.22034/jssta.2025.503663.1228](https://doi.org/10.22034/jssta.2025.503663.1228)

Article Info

Received: 2025-01-31
Accepted: 2025-04-21

Keywords

Free Space Optical
Communication (FSOC),
CCSDS, ESTOL ESA,
SDA, QKD, hybrid RF-
Optical network

How to Cite this article

J. Haghshenas, "Advancing
Free-Space Optical
Communication: A Global
Comparative Analysis of
Standards and Future
Technological Directions",
*Journal of Space Science,
Technology & Applications*,
Vol. 6, No. 1, pp. 21-35, 2026.

Javad Haghshenas^{1*}

^{1*}Satellite System Institute, Iranian Space Research Center (ISRC),
Tehran, Iran

j.haghshenas@isrc.ac.ir

Abstract

Free-Space Optical Communication (FSOC) has emerged as a disruptive technology, redefining the paradigms of space communications through unparalleled data transmission bandwidth, superior security, and reduced latency. This study provides a meticulous and comprehensive review of the key FSOC standards developed by leading international organizations, including the Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), the International Telecommunication Union (ITU), the ESA, and the Space Development Agency (SDA). A comparative analysis of these frameworks highlights their strengths, limitations, and applicability across diverse missions. Critical challenges are discussed, including the absence of global standardization, environmental susceptibility, and scalability constraints in large satellite constellations. These barriers not only limit the interoperability of FSOC systems but also hinder their broader adoption in multi-organizational space missions. Furthermore, the lack of coordinated development efforts and the absence of universal guidelines for integrating emerging technologies exacerbate these challenges. To address these issues, the study explores transformative technological advancements, emphasizing the integration of AI for autonomous network management, Quantum Key Distribution for unprecedented communication security, and hybrid optical-RF networks for robust performance under adverse conditions. Additionally, advancements in adaptive optics and energy-efficient systems are improving FSOC reliability and scalability. This paper provides a critical resource for researchers, engineers, and policymakers, offering an in-depth understanding of FSOC standards, identifying pivotal technological and operational gaps, and presenting forward-looking strategies to position FSOC as the cornerstone of next-generation space communication architectures. By addressing these challenges and leveraging emerging technologies, FSOC can revolutionize global space communications, supporting both scientific exploration and commercial enterprises.

مخابرات اپتیکی فضای آزاد: تحلیل تطبیقی استانداردهای جهانی و چشم‌اندازهای فناوری آینده

جواد حق‌شناس^{۱*}

^{۱*} پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران -

j.haghshenas@isrc.ac.ir

* نویسنده مسئول

دسترس‌پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی

سال ششم، شماره ۱، صفحه ۳۵-۲۱

بهار و تابستان ۱۴۰۵

DOI:

10.22034/jsssta.2025.503663.1228

چکیده

مخابرات اپتیکی فضای آزاد (FSOC) به‌عنوان یک فناوری تحول‌آفرین، پارادایم‌های مخابرات فضایی را با ارائه پهنای باند بی‌نظیر، امنیت اطلاعات فوق‌العاده و کاهش در تأخیر دگرگون کرده است. این مقاله ابتدا مروری جامع و دقیق بر استانداردهای کلیدی در حوزه مخابرات اپتیکی فضایی را ارائه می‌دهد که توسط سازمان‌های بین‌المللی برجسته‌ای مانند کمیته مشورتی سامانه‌های داده فضایی (CCSDS)، اتحادیه بین‌المللی مخابرات (ITU)، آژانس فضایی اروپا (ESA) و آژانس توسعه فضایی (SDA) تدوین شده‌اند. مقایسه و تحلیل تطبیقی این استانداردها، نقاط قوت، محدودیت‌ها و کاربردپذیری آن‌ها را در طیف وسیعی از مأموریت‌های فضایی ارائه می‌دهد. در این مقاله چالش‌های اساسی نظیر نبود استانداردسازی جامع جهانی، تأثیرپذیری از شرایط محیطی و محدودیت‌های مقیاس‌پذیری در منظومه‌های ماهواره‌ای بزرگ، به‌طور سیستماتیک بررسی شده‌اند. این موانع نه تنها قابلیت همکاری سیستم‌های FSOC را محدود می‌کنند، بلکه پذیرش گسترده‌تر این فناوری را در مأموریت‌های چندملیتی پویا به تعویق می‌اندازند. برای مقابله با این چالش‌ها، این مطالعه به بررسی پیشرفت‌های فناورانه تحول‌آفرین پرداخته و بر ادغام هوش مصنوعی برای مدیریت خودکار شبکه، توزیع کلید کوانتومی (QKD) برای امنیت بی‌نظیر و شبکه‌های ترکیبی نوری-رادیویی برای عملکرد پایدار در شرایط نامساعد تأکید دارد. این نوآوری‌ها مسیرهایی امیدبخش برای افزایش مقیاس‌پذیری، قابلیت اطمینان و کارایی عملیاتی سیستم‌های FSOC ارائه می‌دهند و آن‌ها را برای پاسخگویی به تقاضاهای مخابرات فضایی آینده آماده می‌کنند. این مقاله، مرجعی ارزشمند برای پژوهشگران، مهندسان و سیاست‌گذاران فراهم می‌آورد و با ارائه درکی عمیق از استانداردهای مخابرات اپتیکی فضای آزاد، شناسایی شکاف‌های اساسی و استراتژی‌های آینده‌نگر، FSOC را به‌عنوان زیربنای اصلی معماری‌های مخابرات فضایی نسل آینده معرفی می‌کند.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

واژه‌های کلیدی

مخابرات اپتیکی فضای آزاد،
CCSDS, ESA, SDA, QKD
شبکه‌های هیبریدی RF-Optic

نحوه استناد به این مقاله

جواد حق‌شناس، "مخابرات اپتیکی فضای آزاد: تحلیل تطبیقی استانداردهای جهانی و چشم‌اندازهای فناوری آینده"، دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد ششم، شماره اول، صفحات ۳۵-۲۱، ۱۴۰۵.

۱- مقدمه

ESA, ITU به تفصیل معرفی و مشخصات فنی، نقاط قوت و ضعف هرکدام تحلیل می‌گردد. در ادامه، یک تحلیل تطبیقی انجام شده و راهنمایی برای انتخاب استاندارد مناسب بر اساس نوع مأموریت فضایی ارائه می‌شود. پس‌از آن، چالش‌ها و محدودیت‌های کلیدی پیش روی پیاده‌سازی FSOC به صورت نظام‌مند بررسی شده و درنهایت، فناوری‌های نوظهور و چشم‌اندازهای آینده برای غلبه بر این چالش‌ها و پیشبرد این فناوری مورد بحث قرار می‌گیرد. این مقاله می‌کوشد با ارائه یک دیدگاه جامع و تحلیلی، به محققان، مهندسان و تصمیم‌گیران کمک کند تا درک عمیق‌تری از وضعیت فعلی و آینده FSOC کسب کرده و در مسیر توسعه و پیاده‌سازی موفقیت‌آمیز آن گام بردارند.

۲- مبانی فناوری و کاربردهای مخابرات نوری فضای آزاد

ارتباطات نوری فضای آزاد (FSOC) بر انتقال اطلاعات از طریق انتشار پرتو نور مدوله‌شده (معمولاً لیزر) در فضای آزاد (خلاً یا اتمسفر) استوار است. یک سیستم پایه FSOC معمولاً از اجزای کلیدی زیر تشکیل شده است:

- **فرستنده:** شامل منبع نور (لیزر)، مدولاتور (برای نشان دادن اطلاعات بر روی پرتو نور) و سیستم اپتیکی فرستنده (تلسکوپ برای کاهش واگرایی پرتو و هدایت آن).
- **گیرنده:** شامل سیستم اپتیکی گیرنده (تلسکوپ برای جمع‌آوری نور)، فیلترهای نوری (برای حذف نور پس‌زمینه ناخواسته)، آشکارساز نوری (برای تبدیل سیگنال نوری به الکتریکی) و دمدولاتور/پردازشگر سیگنال.
- **سیستم مکان‌یابی، اکتساب و ردیابی (PAT):** مجموعه‌ای حیاتی از حسگرها و مکانیسم‌های کنترلی برای یافتن ترمینال طرف مقابل، برقراری اولیه لینک و حفظ دقیق هم‌راستایی پرتو در طول ارتباط، به‌ویژه بین پلتفرم‌های متحرک. انواع لینک‌های FSOC:

- **لینک بین ماهواره‌ای (ISL):** ارتباط مستقیم بین ماهواره‌ها در فضا که برای ایجاد شبکه‌های ماهواره‌ای مانند منظومه‌های LEO و رله داده حیاتی است. این لینک‌ها از مزیت عدم وجود جو برخوردارند.

در دهه‌های اخیر، جهش در فناوری‌های مخابراتی نقشی حیاتی در پیشبرد اکتشافات و کاربردهای فضایی ایفا کرده است. در این میان، مخابرات نوری فضای آزاد (FSOC) به عنوان یک فناوری پیشگام، پتانسیل ایجاد انقلابی در نحوه تبادل داده‌ها در فضا را دارد [۳-۱]. با بهره‌گیری از طیف نوری و لیزرهای دقیق، FSOC قادر است نرخ انتقال داده را به مراتب فراتر از سیستم‌های رادیویی (RF) سنتی افزایش دهد، امنیت ذاتی ارتباطات را به دلیل ماهیت جهت‌دار پرتو نوری بهبود بخشد و به کاهش قابل توجه وزن، حجم و توان مصرفی (SWaP) تجهیزات مخابراتی در ماهواره‌ها کمک کند [۴، ۵]. این مزایا، FSOC را به گزینه‌ای جذاب برای طیف وسیعی از کاربردهای فضایی، از ارتباطات پرسرعت بین ماهواره‌ای در منظومه‌های بزرگ گرفته تا ارسال حجم عظیم داده‌های علمی از مأموریت‌های اعماق فضا، تبدیل کرده است [۶، ۷].

با وجود این پتانسیل چشمگیر، تحقق کامل وعده‌های FSOC با چالش‌های متعددی روبروست. یکی از مهم‌ترین موانع، فقدان یک چارچوب استانداردسازی جهانی و یکپارچه است. در حال حاضر، سازمان‌های مختلفی مانند ITU، ESA، SDA، و CCSDS هر یک استانداردهای خود را با تمرکز بر نیازهای مأموریتی خاص توسعه داده‌اند [۸-۲۴]. این تنوع، اگرچه نشان‌دهنده پویایی این حوزه است، اما منجر به بروز مشکلات قابلیت همکاری (Interoperability) بین سیستم‌های توسعه‌یافته توسط نهادهای مختلف شده و مانعی جدی بر سر راه ایجاد شبکه‌های فضایی یکپارچه و جهانی است. علاوه بر استانداردسازی، چالش‌های فنی و عملیاتی دیگری نیز وجود دارند؛ از جمله تأثیرات مخرب جو زمین بر لینک‌های نوری زمین-به-ماهواره، پیچیدگی سیستم‌های دقیق مکان‌یابی، اکتساب و ردیابی (PAT) مورد نیاز برای حفظ لینک بین پلتفرم‌های متحرک و دشواری‌های مقیاس‌پذیری و مدیریت شبکه‌های نوری متشکل از هزاران گره مختلف [۲۵-۲۸].

هدف اصلی این مقاله، ارائه یک تحلیل جامع و تطبیقی از استانداردهای کلیدی FSOC موجود و استخراج راهنمایی‌های عملی برای جامعه تحقیقاتی و صنعتی فعال در این حوزه است. در این راستا، ابتدا مبانی فناوری و کاربردهای FSOC به اختصار مرور می‌شود. سپس، نهادهای اصلی استانداردسازی و چارچوب‌های ارائه‌شده توسط آن‌ها (CCSDS، SDA، ESTOL)

• **ارتباطات رله داده:** استفاده از ماهواره‌های GEO به عنوان هاب برای رله داده‌ها از ماهواره‌های LEO یا فضاپیماهای دورتر به زمین.

درک این مبانی و کاربردها برای تحلیل و مقایسه استانداردهای مختلف FSOC که در بخش‌های بعدی بررسی می‌شوند، ضروری است.

۳- استانداردها و چارچوب‌های کلیدی

توسعه و پذیرش گسترده هر فناوری پیچیده‌ای، نیازمند وجود استانداردهای فنی و عملیاتی است که قابلیت همکاری، کارایی و ایمنی را تضمین کنند. در حوزه FSOC فضایی، چندین سازمان بین‌المللی نقشی کلیدی در تدوین این استانداردها ایفا کرده‌اند. هر یک از این نهادها با دیدگاه و تمرکز متفاوتی به این موضوع پرداخته‌اند:

• **کمیته مشورتی سامانه‌های داده فضایی (CCSDS):** این کمیته که با همکاری آژانس‌های فضایی بزرگ (مانند NASA, ESA, JAXA) فعالیت می‌کند، یکی از قدیمی‌ترین و معتبرترین نهادها در استانداردسازی ارتباطات فضایی است. استانداردهای CCSDS عمدتاً بر مأموریت‌های علمی، اکتشافات فضایی و اعماق فضا متمرکز هستند و هدف آن‌ها تضمین قابلیت همکاری در مأموریت‌های بین‌المللی با الزامات عملکردی بالا و شرایط عملیاتی خاص است [۱۱-۱۸].

• **آژانس توسعه فضایی (SDA):** این آژانس که بخشی از وزارت دفاع ایالات متحده است، با هدف تسریع توسعه و استقرار قابلیت‌های فضایی نسل جدید، به‌ویژه منظومه‌های ماهواره‌ای بزرگ در مدار پایین (LEO) برای کاربردهای دفاعی و تجاری، استانداردهای FSOC خود را تدوین کرده است. تمرکز اصلی SDA بر مقیاس‌پذیری، تولید انبوه، هزینه پایین و قابلیت همکاری بین تعداد زیادی ترمینال از سازندگان مختلف است [۱۹].

• **آژانس فضایی اروپا (ESA):** این آژانس از طریق برنامه‌ها و چارچوب‌هایی مانند ESTOL (European Space Telecommunication Optical Link) به دنبال توسعه راه‌حل‌های FSOC پیشرفته و قابل اطمینان برای طیف وسیعی از مأموریت‌ها، از جمله رصد زمین، مخابرات و کاربردهای علمی است. ESA تأکید ویژه‌ای بر پایداری لینک، عملکرد در شرایط

• **لینک زمین به ماهواره/ماهواره به زمین (Uplink/Downlink):** ارتباط بین ایستگاه زمینی و ماهواره. این لینک‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط جوی قرار دارند.

• **لینک اعماق فضا:** ارتباط با فضاپیماها در فواصل بسیار دور (مانند مأموریت‌های بین سیاره‌ای) که نیازمند سیستم‌های بسیار حساس و پرتوان است.

مزایای کلیدی FSOC:

• **پهنای باند بسیار بالا:** طیف نوری هزاران بار وسیع‌تر از طیف رادیویی است و امکان انتقال داده با نرخ‌های بسیار بالا (Gbps تا Tbps) را فراهم می‌کند [۱-۵].

• **امنیت ذاتی بالاتر:** ماهیت بسیار جهت‌دار پرتو لیزر، استراق سمع یا ایجاد پارازیت عمدی را بسیار دشوارتر از سیستم‌های RF می‌کند [۴، ۵].

• **عدم نیاز به مجوز طیف فرکانس:** برخلاف RF، طیف نوری نیاز به تخصیص فرکانس و اخذ مجوز ندارد (اگرچه هماهنگی‌هایی لازم است).

• **کاهش وزن، حجم و توان مصرفی (SWaP):** تجهیزات نوری معمولاً نسبت به تجهیزات RF معادل با کارایی مشابه، کوچک‌تر، سبک‌تر و کم‌مصرف‌تر هستند که برای پرتاب و عملکرد ماهواره‌ها مزیت بزرگی محسوب می‌شود [۴، ۵].

• **مقاومت در برابر تداخل الکترومغناطیسی (EMI):** لینک‌های نوری ذاتاً در برابر تداخلات الکترومغناطیسی ایمن هستند.

کاربردهای اصلی:

FSOC در حال حاضر در کاربردهای مختلفی موردتوجه است یا به کار گرفته شده است:

• منظومه‌های ماهواره‌ای LEO: مانند Starlink و OneWeb که از ISL‌های نوری برای ایجاد یک شبکه ستون فقرات (backbone) پرسرعت در فضا استفاده می‌کنند [۲۹].

• مأموریت‌های رصد زمین: برای ارسال سریع حجم بالای داده‌های تصویری و سنجشی به زمین.

• مأموریت‌های علمی و اکتشافات فضایی: مانند LLCD ناسا که ارتباط لیزری با ماه را با موفقیت نشان داد [۶، ۷].

○ برد عملیاتی: طراحی شده برای فواصل بسیار طولانی، از لینک‌های GEO تا مأموریت‌های بین سیاره‌ای

○ الزامات PAT: نیاز به دقت بسیار بالا در حد میکرو رادیان یا بهتر، به دلیل فواصل طولانی و پرتوهای باریک

• **ملاحظات طراحی:** سیستم‌ها معمولاً پیچیده، نیازمند قطعات با کیفیت بالا و فناوری‌های پیشرفته هستند که منجر به هزینه بالا می‌شود

• **نقاط قوت:** عملکرد استثنایی در لینک‌های بسیار طولانی و با محدودیت توان، قابلیت اطمینان بالا، استانداردسازی دقیق لایه‌های فیزیکی و لینک داده برای مأموریت‌های علمی

• **محدودیت‌ها:** هزینه بالا و پیچیدگی فنی، عدم بهینه‌سازی برای تولید انبوه و کاربردهای تجاری در مقیاس بزرگ مانند منظومه‌های LEO، انعطاف‌پذیری کمتر برای تطبیق سریع با فناوری‌های جدید تجاری

۴-۲- استانداردهای SDA

• **تمرکز و مأموریت هدف:** منظومه‌های ماهواره‌ای بزرگ در مدار پایین (LEO) برای کاربردهای دفاعی و تجاری، با تأکید بر قابلیت همکاری بین سازندگان مختلف، مقیاس‌پذیری و هزینه پایین [۱۹].

• مشخصات فنی کلیدی:

○ طول موج: انعطاف‌پذیری بیشتر در انتخاب طول موج، معمولاً در باندهای ۸۵۰ نانومتر، ۱۰۶۴ نانومتر و ۱۵۵۰ نانومتر، بسته به لایه شبکه و سازنده

○ مدولاسیون و کدینگ: استفاده از روش‌های مدولاسیون ساده‌تر و رایج‌تر مانند On-Off Keying (OOK) یا Differential Phase-Shift Keying (DPSK) که پیاده‌سازی و تولید را آسان‌تر می‌کند. کدهای تصحیح خطا ممکن است ساده‌تر از LDPC باشند.

○ نرخ داده: ۱۰ الی چند صد گیگابیت بر ثانیه برای فواصل مداری LEO

○ برد عملیاتی: بهینه‌سازی شده برای لینک‌های بین ماهواره‌ای در LEO (چند هزار کیلومتری)

○ الزامات PAT: نیاز به سیستم PAT قوی اما احتمالاً با الزامات دقت کمی ساده‌تر از CCSDS برای فواصل کوتاه‌تر LEO

• **ملاحظات طراحی:** تمرکز بر طراحی برای تولید انبوه (Design for Manufacturability)، کاهش هزینه، قابلیت

چالش‌برانگیز و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های هیبریدی و امنیت کوانتومی دارد [۲۰].

• **اتحادیه بین‌المللی مخابرات (ITU):** به عنوان نهاد تخصصی سازمان ملل در زمینه فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات، ITU مسئولیت مدیریت طیف فرکانسی جهانی و مدارهای ماهواره‌ای را بر عهده دارد. اگرچه ITU مستقیماً استانداردهای فنی دقیقی برای طراحی ترمینال‌های FSOC ارائه نمی‌دهد، اما توصیه‌های آن در زمینه تخصیص طول موج‌های نوری، کاهش تداخل و هماهنگی بین‌المللی برای تضمین همزیستی مسالمت‌آمیز سیستم‌های مختلف FSOC در مقیاس جهانی، نقشی حیاتی ایفا می‌کند [۲۳، ۲۴].

درک فلسفه و حوزه تمرکز هر یک از این نهادها، کلید فهم تفاوت‌ها و شباهت‌های استانداردهای ارائه‌شده توسط آن‌هاست که در بخش بعدی به تفصیل تحلیل خواهند شد.

۴- تحلیل تفصیلی استانداردهای FSOC

در این بخش، مشخصات فنی، الزامات طراحی، نقاط قوت و ضعف هر یک از چارچوب‌های استانداردسازی کلیدی FSOC که توسط SDA، CCSDS، ESA و ITU ارائه شده‌اند، به طور دقیق‌تری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- استانداردهای CCSDS

• **تمرکز و مأموریت هدف:** مأموریت‌های علمی، اکتشافات فضایی، اعماق فضا و بین‌سیاره‌ای که نیازمند قابلیت اطمینان بالا، عملکرد عالی در فواصل بسیار طولانی و مدیریت داده‌های حجیم هستند [۸-۱۸].

• مشخصات فنی کلیدی:

○ طول موج: عمدتاً ۱۰۶۴ نانومتر و ۱۵۵۰ نانومتر، با هدف بهینه‌سازی برای انتقال در فضا و کاهش تلفات

○ مدولاسیون و کدینگ: استفاده از روش‌های پیشرفته و بسیار کارآمد از نظر توان مانند Pulse-Position Modulation (PPM) همراه با کدهای تصحیح خطای قدرتمند نظیر Low-Density Parity-Check (LDPC) برای دستیابی به حساسیت بالایی گیرنده در لینک‌های با سیگنال ضعیف

○ نرخ داده: نرخ‌های چند صد مگابیت بر ثانیه برای فواصل نزدیک و نرخ‌های کمتر از ۱۰ مگابیت بر ثانیه برای مأموریت‌های اعماق فضا

- **نقاط قوت:** تطبیق پذیری بالا برای مأموریت‌های مختلف، تمرکز بر پایداری و عملکرد در شرایط سخت، پیشرو در ادغام فناوری‌های نوین مانند QKD و لینک‌های هیبریدی
- **محدودیت‌ها:** هزینه و پیچیدگی عملیاتی بالا، به‌ویژه برای سیستم‌های هیبریدی یا کوانتومی، ممکن است برای کاربردهای تجاری صرف یا منظومه‌های بسیار بزرگ کمتر جذاب باشد

۴-۴- توصیه‌های ITU

- **تمرکز و مأموریت هدف:** هماهنگی جهانی استفاده از طیف نوری برای جلوگیری از تداخل و تضمین همزیستی سیستم‌های مختلف FSOC در مقیاس بین‌المللی [۲۳، ۲۴]
- مشخصات فنی کلیدی:
 - تخصیص طیف: ارائه راهنما و توصیه‌هایی برای باند‌های طول موجی مناسب برای کاربردهای مختلف FSOC فضایی و زمینی
 - کاهش تداخل: ارائه دستورالعمل‌هایی برای به حداقل رساندن تداخل بین سیستم‌های FSOC مختلف و همچنین با سایر سرویس‌های فضایی یا زمینی
 - عدم تعریف مشخصات لینک: ITU معمولاً وارد جزئیات فنی طراحی لایه فیزیکی یا پروتکل‌های لینک داده نمی‌شود و این امر را به نهادهای دیگر مانند CCSDS یا سازندگان واگذار می‌کند
- **ملاحظات طراحی:** مرکز بر جنبه‌های مقرراتی (Regulatory) و هماهنگی بین‌المللی.

- **نقاط قوت:** تضمین هماهنگی در سطح جهانی، ایجاد چارچوبی برای استفاده منظم و بدون تداخل از منابع طیفی نوری، تسهیل همکاری‌های بین‌المللی
 - **محدودیت‌ها:** عدم ارائه راهکارهای فنی جامع برای طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های FSOC، وابستگی به سایر استانداردها برای جزئیات فنی
- این تحلیل تفصیلی نشان می‌دهد که هر استاندارد با هدف و مجموعه‌ای از اولویت‌های خاص طراحی شده است. در بخش بعدی، این استانداردها به صورت تطبیقی مقایسه شده و راهنمایی برای انتخاب مناسب‌ترین گزینه ارائه خواهد شد.

همکاری از طریق تعریف دقیق واسطه‌ها (interfaces) و مدیریت خودکار شبکه.

- **نقاط قوت:** هزینه پایین‌تر، مقیاس‌پذیری بالا برای شبکه‌های عظیم، تسهیل تولید انبوه و رقابت بین سازندگان، قابلیت همکاری خوب در چارچوب تعریف شده
- **محدودیت‌ها:** عملکرد ممکن است در شرایط محیطی بسیار سخت یا برای مأموریت‌های نیازمند حداکثر بهره‌وری توان (مانند اعماق فضا) بهینه نباشد، تمرکز کمتر بر حداکثر کارایی ممکن در لایه فیزیکی نسبت به استاندارد CCSDS

۴-۳- چارچوب ESTOL آژانس فضایی اروپا (ESA)

- **تمرکز و مأموریت هدف:** ارائه راه‌حل‌های FSOC پیشرفته، قابل‌اطمینان و تطبیق‌پذیر برای طیف وسیعی از مأموریت‌های اروپایی، شامل رصد زمین، مخابرات، ناوبری و علمی، با تأکید بر پایداری و امنیت [۲۰].
- مشخصات فنی کلیدی:
 - رویکرد هیبریدی: تشویق یا در نظر گرفتن استفاده از سیستم‌های ترکیبی نوری-رادیویی برای افزایش قابلیت اطمینان در شرایط جوی نامساعد
 - طول موج: تمرکز بر ۱۵۵۰ نانومتر برای کاهش تأثیرات جوی و بهره‌گیری از فناوری‌های بالغ مخابرات نوری زمینی
 - مدولاسیون و کدینگ: استفاده از مدولاسیون‌های پیشرفته مانند DPSK یا مدولاسیون‌های هم‌دوس (Coherent) برای کارایی بالا.
 - امنیت: توجه ویژه به امنیت با در نظر گرفتن امکان استفاده از توزیع کلید کوانتومی (QKD) در معماری‌های آینده
 - نرخ داده: از مرتبه چند صد مگابیت بر ثانیه تا 10Gbps متناسب با برد عملیاتی
 - برد عملیاتی: طراحی شده برای کاربردهای متنوع از LEO تا GEO
 - الزامات PAT: نیاز به سیستم‌های PAT پیشرفته، به‌ویژه برای مدولاسیون‌های هم‌دوس یا لینک‌های هیبریدی
- **ملاحظات طراحی:** تأکید بر قابلیت تطبیق‌پذیری، کارایی بالا و پایداری که ممکن است منجر به پیچیدگی و هزینه بالاتر نسبت به رویکرد SDA شود.

۵- تحلیل تطبیقی و راهنمای انتخاب استاندارد

۵-۱- مقایسه جامع استانداردها

پس از بررسی مشخصات هر یک از چارچوب‌های استانداردسازی، در این بخش به مقایسه تطبیقی آن‌ها پرداخته و راهنمایی عملی برای انتخاب استاندارد مناسب بر اساس الزامات مأموریت‌های فضایی مختلف ارائه می‌شود.

جدول (۱): مقایسه تطبیقی استانداردهای کلیدی FSOC

ویژگی	CCSDS	SDA	ESA (ESTOL)	ITU
تمرکز اصلی	مأموریت‌های علمی/اعمق فضا، قابلیت اطمینان بالا	منظومه‌های LEO، مقیاس‌پذیری، هزینه پایین، قابلیت همکاری	مأموریت‌های متنوع اروپایی، پایداری، امنیت، فناوری‌های نوین	همه‌انگهی جهانی طیف نوری، کاهش تداخل
مأموریت‌های هدف	بین‌سیاره‌ای، GEO، علمی	منظومه‌های بزرگ LEO (دفاعی/تجاری)	GEO، LEO، علمی، رصد زمین، هیبریدی	تمامی مأموریت‌ها در سطح بین‌المللی
طول موج پیشنهادی	۱۰۶۴ nm, ۱۵۵۰ nm	۸۵۰ nm, ۱۰۶۴ nm, ۱۵۵۰ nm	عمدتاً ۱۵۵۰ nm	راهنمایی برای باندهای مختلف
مدولاسیون/کدینگ	PPM, LDPC (کارایی توان بالا)	OOK, DPSK (سادگی، هزینه پایین)	DPSK, Coherent (کارایی بالا)، QKD (امنیت)	نامشخص (وابسته به سایر استانداردها)
نرخ داده معمول	10 Mbps~1 Gbps	100 Gbps	1-10 Gbps	-
برد معمول	Deep Space, Interplanetary	LEO ISL (چند هزار km)	LEO تا GEO و فراتر	-
پیچیدگی/هزینه	بالا	پایین تا متوسط	بالا	- (مقرراتی)
مقیاس‌پذیری	محدود	بسیار بالا	متوسط تا بالا	-
امنیت ذاتی	بالا (با رمزنگاری استاندارد)	متوسط (بسته به پیاده‌سازی)	بسیار بالا (با QKD)	-
قابلیت همکاری	خوب در اکوسیستم CCSDS	بسیار خوب در اکوسیستم SDA	در حال توسعه	حیاتی برای همکاری جهانی
نقاط قوت کلیدی	عملکرد عالی در فواصل دور، قابلیت اطمینان	هزینه پایین، تولید انبوه، مقیاس‌پذیری	پایداری، امنیت، تطبیق‌پذیری، فناوری نوین	همه‌انگهی جهانی
محدودیت‌های کلیدی	هزینه، پیچیدگی، عدم بهینگی برای LEO تجاری	عملکرد محدودتر در شرایط سخت، امنیت پایه	هزینه، پیچیدگی (هیبرید QKD)	عدم ارائه جزئیات فنی لینک

۵-۲- راهنمای انتخاب استاندارد برای مأموریت‌های مختلف

تحلیل کلیدی:

انتخاب استاندارد FSOC متناسب، تصمیمی حیاتی است که باید بر اساس الزامات و محدودیت‌های خاص هر مأموریت فضایی گرفته شود. در ادامه همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، راهنمایی عملی بر اساس نوع مأموریت ارائه می‌شود. علاوه بر آن شکل ۲ می‌تواند به‌صورت شماتیک این انتخاب را نمایش دهد و به‌صورت یک Look-up Figure کاربردی برای متخصصین این حوزه عمل نماید.

• Trade-off اصلی: یک بده-بستان اساسی بین

عملکرد/قابلیت اطمینان (که در CCSDS و تا حدی ESA اولویت دارد) و هزینه/مقیاس‌پذیری (که اولویت اصلی SDA است) وجود دارد.

• **قابلیت همکاری:** SDA با تعریف استانداردهای دقیق برای ترمینال‌ها، به دنبال ایجاد یک بازار رقابتی با قابلیت همکاری بالا بین فروشندگان مختلف است، درحالی‌که CCSDS قابلیت همکاری را بیشتر در سطح پروتکل‌ها و برای مأموریت‌های علمی تضمین می‌کند. ESA نیز بر قابلیت همکاری در چارچوب برنامه‌های اروپایی تمرکز دارد. نقش ITU در تضمین عدم تداخل در سطح جهانی برای همه حیاتی است.

• **نوآوری:** ESA به‌طور فعال‌تری در حال بررسی و ادغام فناوری‌های بسیار نوین مانند QKD و لینک‌های هیبریدی در چارچوب استانداردهای خود است.

الزامات عملکردی و قابلیت اطمینان بالای GEO کافی نیست. ITU برای هماهنگی بین‌المللی ضروری است.

- مأموریت‌های اعماق فضا و بین‌سیاره‌ای (اکتشافات علمی):
 ◦ الزامات کلیدی: حداکثر کارایی توان (لینک‌های بسیار ضعیف)، برد بسیار طولانی، قابلیت اطمینان فوق‌العاده، مدیریت حجم زیاد داده‌های علمی.

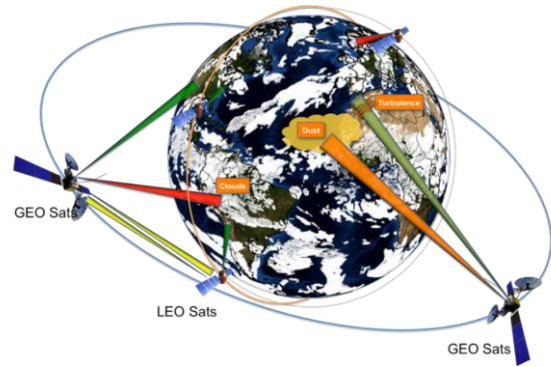
- استاندارد پیشنهادی اصلی: CCSDS این استانداردها مشخصاً برای پاسخگویی به این چالش‌های منحصربه‌فرد طراحی شده‌اند (مانند استفاده از PPM و LDPC).

- گزینه‌های دیگر: ESA (ESTOL) می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب پیشرفته مکمل یا جایگزین در نظر گرفته شود، به‌ویژه اگر نیازهای خاصی مانند امنیت کوانتومی مطرح باشد. SDA به‌هیچ‌وجه برای این کاربرد مناسب نیست. ITU نقش کمتری دارد مگر در هماهنگی با ایستگاه‌های زمینی.

- مأموریت‌های چندملیتی و نیازمند هماهنگی بین‌المللی:
 ◦ الزامات کلیدی: قابلیت همکاری بین سیستم‌های کشورهای مختلف، عدم تداخل.

- نقش کلیدی: ITU در اینجا نقش محوری دارد و پایبندی به توصیه‌های آن برای همه طرف‌ها ضروری است. انتخاب استاندارد فنی (CCSDS, SDA, ESA) باید با در نظر گرفتن قابلیت همکاری بین شرکای بین‌المللی و با رعایت چارچوب‌های ITU صورت گیرد.

این راهنما نشان می‌دهد که هیچ استاندارد «بهترین» برای همه کاربردها نیست و انتخاب باید با دقت و بر اساس تحلیل نیازمندی‌های مشخص هر مأموریت انجام شود. تحلیل ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند به‌عنوان نقطه شروعی برای این فرآیند تصمیم‌گیری عمل کند.



شکل (۱): شمای مفهومی مأموریت‌های مختلف مخابرات ایتیکی [۱۸]

- مأموریت‌های منظومه ماهواره‌ای LEO (مانند اینترنت ماهواره‌ای، رصد پیوسته):

- الزامات کلیدی: مقیاس‌پذیری بالا (هزاران ماهواره)، هزینه پایین هر ترمینال، تولید انبوه، مدیریت خودکار شبکه، نرخ داده بالا. (Gbps)

- استاندارد پیشنهادی اصلی: SDA این استاندارد دقیقاً برای همین کاربرد طراحی شده و بر قابلیت همکاری، هزینه و تولید انبوه تمرکز دارد.

- گزینه‌های دیگر: ESA (ESTOL) ممکن است برای مأموریت‌هایی که نیاز به پایداری بالاتر در برابر شرایط محیطی دارند (با پذیرش هزینه بیشتر) یا به دنبال قابلیت‌های امنیتی پیشرفته‌تر هستند، مناسب باشد. CCSDS به دلیل هزینه و پیچیدگی بالا و عدم تمرکز بر تولید انبوه، معمولاً برای این کاربرد بهینه نیست. ITU برای هماهنگی طیفی ضروری است.

- مأموریت‌های مدار زمین‌آهنگ (GEO) (مانند رله داده، مخابرات ثابت):

- الزامات کلیدی: قابلیت اطمینان بسیار بالا، عمر طولانی، نرخ داده بالا و پایدار، امنیت قوی، عملکرد در فواصل طولانی (لینک به زمین یا LEO).

- استاندارد پیشنهادی اصلی: CCSDS این استانداردها برای عملکرد بالا و قابلیت اطمینان در فواصل طولانی و شرایط محیط اعماق فضا بهینه شده‌اند.

- گزینه‌های دیگر: ESA (ESTOL) به دلیل تمرکز بر پایداری و قابلیت اطمینان (به‌ویژه با رویکرد هیبریدی) و امنیت، گزینه بسیار مناسب دیگری است. SDA معمولاً برای

۶-۲- مکان‌یابی، اکتساب و ردیابی (PAT)

برای برقراری و حفظ یک لینک نوری، به‌ویژه بین دو پلتفرم متحرک (مانند دو ماهواره LEO یا ماهواره و ایستگاه زمینی)، نیاز به هم‌راستایی بسیار دقیق پرتوهای لیزری وجود دارد که معمولاً در حد میکرو رادیان یا بهتر است [۳۶، ۲۵]. سیستم PAT مسئول انجام این وظیفه حیاتی است. چالش‌های اصلی در این زمینه عبارت‌اند از:

- **دقت مورد نیاز:** دستیابی و حفظ دقت اشاره در حد میکرو رادیان نیازمند حسگرها، عملگرها و الگوریتم‌های کنترلی بسیار پیشرفته است.

- **ارتعاشات پلتفرم:** لرزش‌های ناشی از عملکرد سایر زیرسیستم‌های ماهواره می‌تواند فرآیند PAT را مختل کند.

- **سرعت و پیچیدگی اکتساب:** فرآیند یافتن اولیه ترمینال دیگر و قفل کردن لینک باید به‌سرعت انجام شود، به‌ویژه در شبکه‌های پویا.

- **هزینه و پیچیدگی سیستم PAT:** این سیستم‌ها بخش قابل‌توجهی از هزینه و پیچیدگی یک ترمینال نوری را تشکیل می‌دهند.

۶-۳- مقیاس‌پذیری و مدیریت شبکه

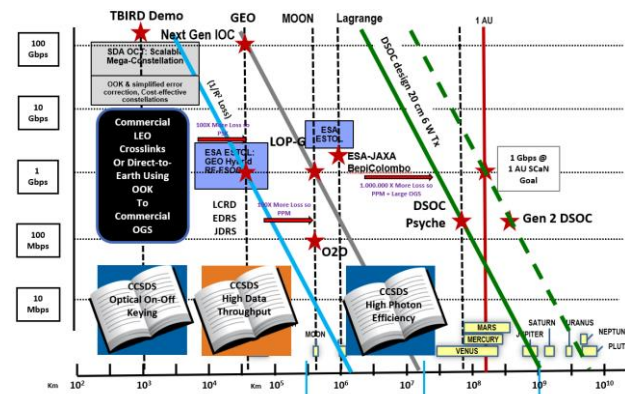
با ظهور منظومه‌های ماهواره‌ای عظیم متشکل از صدها یا هزاران ماهواره که از طریق لینک‌های نوری به هم متصل هستند، چالش مقیاس‌پذیری و مدیریت شبکه اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند [۳۷، ۳۸].

- **مسیریابی پویا:** تعیین مسیر بهینه برای انتقال داده‌ها در یک شبکه بزرگ و دائماً در حال تغییر (به دلیل حرکت ماهواره‌ها) بسیار پیچیده است.

- **مدیریت لینک:** برقراری، حفظ و قطع لینک‌های نوری متعدد به‌صورت خودکار و کارآمد.

- **تخصیص منابع:** مدیریت پهنای باند و سایر منابع شبکه بین کاربران و لینک‌های مختلف.

- **نیاز به خودمختاری:** به دلیل تعداد زیاد ماهواره‌ها و تأخیر ارتباط با زمین، نیاز مبرمی به مدیریت شبکه به‌صورت خودکار و هوشمند در خود فضا وجود دارد.



شکل (۲): گراف مرجع برای انتخاب متناسب‌ترین استاندارد بر اساس شرایط مأموریتی

۶- چالش‌ها و محدودیت‌های کلیدی در

پیاده‌سازی FSOC

علی‌رغم پتانسیل بالای FSOC، پیاده‌سازی عملی و گسترده آن در محیط فضا با چالش‌ها و محدودیت‌های قابل‌توجهی روبروست. درک این موانع برای توسعه راهکارهای مؤثر و واقع‌بینانه ضروری است.

۶-۱- اثرات محیطی و جوی

شاید شناخته‌شده‌ترین چالش FSOC، به‌ویژه برای لینک‌های زمین-فضا، آسیب‌پذیری به شرایط جوی باشد [۶، ۷]. برخلاف امواج رادیویی که تا حد زیادی می‌توانند از موانع جوی عبور کنند، پرتوهای نوری به‌شدت تحت تأثیر پدیده‌هایی مانند:

- **آشفته‌گی جوی (Atmospheric Turbulence):** ناشی از تغییرات ضریب شکست هوا به دلیل دما و فشار که باعث اعوجاج جبهه موج نوری، نوسانات شدت سیگنال (Scintillation) و انحراف پرتو می‌شود [۲۱، ۳۰].

- **پوشش ابر، مه و بارش:** این موارد می‌توانند باعث تضعیف شدید یا قطع کامل لینک نوری شوند [۶، ۷، ۲۱].

- **پراکندگی و جذب:** ذرات معلق در جو (Aerosols) و مولکول‌های هوا باعث پراکندگی و جذب بخشی از انرژی پرتو می‌شوند.

اگرچه فناوری‌هایی مانند اپتیک تطبیقی برای اندازه‌گیری و تصحیح اعوجاجات جبهه موج توسعه یافته‌اند [۳۱-۳۴]، اما این سیستم‌ها پیچیده، گران‌قیمت و نیازمند منابع پردازشی و انرژی هستند و ممکن است نتوانند تمام اثرات جوی، به‌ویژه پوشش ابری غلیظ را جبران کنند.

۴-۶- استانداردسازی و قابلیت همکاری

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، فقدان یک استاندارد جهانی یکپارچه برای FSOC یک مانع بزرگ است. وجود استانداردهای متعدد (CCSDS, SDA, ESA) که هر کدام برای اهداف خاصی توسعه یافته‌اند، منجر به مشکلات زیر می‌شود:

- **عدم قابلیت همکاری:** ترمینال‌های ساخته شده بر اساس استانداردهای مختلف، یا حتی توسط سازندگان مختلف تحت یک استاندارد (اگر به اندازه کافی دقیق نباشد)، ممکن است نتوانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند.
- **افزایش هزینه و پیچیدگی:** نیاز به توسعه یا تطبیق سیستم‌ها برای پشتیبانی از استانداردهای مختلف.
- **کندی در پذیرش جهانی:** عدم قطعیت در مورد استاندارد غالب یا آینده، می‌تواند سرمایه‌گذاری و پذیرش گسترده فناوری را به تأخیر بیندازد.

۵-۶- امنیت

اگرچه جهت‌دار بودن پرتو FSOC امنیت ذاتی بیشتری نسبت به RF ایجاد می‌کند، اما همچنان نگرانی‌های امنیتی وجود دارد [۳۹-۴۱].

• **شنود (Eavesdropping):** اگرچه دشوار است، اما امکان جمع‌آوری بخش کوچکی از نور پراکنده شده یا تلاش برای قرار گرفتن در مسیر اصلی پرتو (به‌ویژه در لینک‌های زمینی) وجود دارد.

• **ایجاد اختلال یا پارازیت (Jamming):** امکان تاباندن یک منبع نور قوی به سمت گیرنده برای اشباع کردن آشکارساز آن وجود دارد.

• **حملات انکار سرویس (Denial of Service):** هدف قرار دادن سیستم PAT یا اختلال در فرآیند اکتساب لینک.

• **نیاز به رمزنگاری قوی:** امنیت ذاتی کافی نیست و نیاز به رمزنگاری قوی داده‌ها در لایه‌های بالاتر وجود دارد. چالش پیاده‌سازی پروتکل‌های امنیتی پیشرفته مانند QKD در محیط فضا همچنان باقی است.

۶-۶- بهره‌وری انرژی و محدودیت منابع

سیستم‌های FSOC، به‌ویژه لیزرهای پر قدرت و الکترونیک پردازشی آن‌ها، می‌توانند مصرف انرژی قابل توجهی داشته باشند. این موضوع در محیط فضا که منابع انرژی محدود هستند (به‌ویژه در ماهواره‌های کوچک یا مأموریت‌های طولانی‌مدت اعماق فضا) یک چالش مهم است [۴۲، ۴۳].

- **بازده تبدیل انرژی:** بازده لیزرها و سایر قطعات الکترونیکی در تبدیل انرژی الکتریکی به نور یا پردازش، مستقیماً بر میزان حرارت تولیدی و توان مورد نیاز تأثیر می‌گذارد.
- **مدیریت حرارتی:** دفع حرارت تولید شده توسط لیزر و الکترونیک در خلأ فضا چالش برانگیز است.
- **محدودیت‌های ماهواره:** اندازه پنل‌های خورشیدی و ظرفیت باتری‌ها، توان قابل دسترس برای زیرسیستم FSOC را محدود می‌کند.

۷-۶- هزینه و پیچیدگی

توسعه، ساخت و آزمایش ترمینال‌های نوری فضایی فرآیندی پیچیده و پرهزینه است.

- **قطعات اپتوالکترونیکی:** نیاز به قطعات با کیفیت فضایی (Space-grade) که معمولاً گران‌تر هستند.
- **سیستم PAT:** همان‌طور که گفته شد، سیستم PAT بخش قابل توجهی از هزینه و پیچیدگی را تشکیل می‌دهد.
- **آزمایش و صحت‌گذاری:** نیاز به تجهیزات و زیرساخت‌های آزمایشگاهی و زمینی پیشرفته برای تست و صحت‌گذاری عملکرد سیستم.
- **غلبه بر این چالش‌ها:** نیازمند نوآوری‌های فناورانه، همکاری‌های بین‌المللی و تلاش‌های مستمر در جهت استانداردسازی و کاهش هزینه‌ها است که در بخش بعدی به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۷- فناوری‌های نوظهور و چشم‌انداز آینده FSOC

برای عبور از چالش‌های ذکر شده و تحقق کامل پتانسیل FSOC، تحقیقات و توسعه بر روی مجموعه‌ای از فناوری‌های نوظهور و رویکردهای نوین متمرکز شده است. این جهت‌گیری‌ها، آینده مخابرات نوری در فضا را شکل خواهند داد.

۷-۱- ارتقاء امنیت با رمزنگاری کوانتومی (QKD)

برای پاسخ به چالش امنیت (بخش ۶.۵)، توزیع کلید کوانتومی (Quantum Key Distribution - QKD) راهکاری بنیادین ارائه می‌دهد. QKD با بهره‌گیری از اصول مکانیک کوانتومی، امکان تولید و توزیع کلیدهای رمزنگاری را فراهم می‌کند که امنیت آن‌ها در برابر هرگونه تلاش برای شنود (حتی با کامپیوترهای کوانتومی آینده) تضمین شده است [۳۹-۴۲]. ادغام QKD با FSOC می‌تواند سطح امنیت بی‌سابقه‌ای را برای ارتباطات فضایی حساس (نظامی، دولتی، تجاری) به ارمغان آورد. اگرچه آزمایش‌های موفق در زمینه QKD ماهواره‌ای انجام شده است، اما چالش‌هایی مانند حساسیت به تلفات کانال، نیاز به قطعات کوانتومی دقیق و استانداردسازی پروتکل‌ها برای پیاده‌سازی گسترده آن همچنان باقی است [۴۲، ۴۴].

۷-۲- افزایش پایداری با شبکه‌های هیبریدی نوری-رادیویی

برای غلبه بر مشکل اصلی FSOC یعنی آسیب‌پذیری به شرایط جوی (بخش ۶.۱)، سیستم‌های هیبریدی نوری-رادیویی (Hybrid Optical/RF) یک راه‌حل عملی ارائه می‌دهند [۳۰، ۴۵]. این سیستم‌ها از هر دو فناوری نوری و رادیویی به‌صورت مکمل استفاده می‌کنند. در شرایط جوی مساعد، از لینک نوری پرسرعت استفاده می‌شود و در صورت بروز شرایط نامساعد (مانند ابر یا باران شدید) که لینک نوری را مختل می‌کند، سیستم به‌صورت خودکار به لینک رادیویی پشتیبان (که پایداری آن با سرعت پایین‌تر است) سوئیچ می‌کند. این رویکرد، قابلیت اطمینان کلی سیستم را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و برای مأموریت‌هایی که نیاز به ارتباطات پایدار دارند، بسیار جذاب است. استانداردسازی واسط‌ها و پروتکل‌های سوئیچینگ بین نوری و RF یک حوزه کاری مهم در این زمینه است.

۷-۳- غلبه بر اثرات جوی با اپتیک تطبیقی پیشرفته و هوش مصنوعی

پیشرفت‌های مداوم در اپتیک تطبیقی (AO) همچنان نقشی کلیدی در بهبود عملکرد لینک‌های زمین-فضا ایفا می‌کند [۳۱، ۳۲]. توسعه آینه‌های تغییرشکل‌پذیر (Deformable Mirrors) با سرعت و دقت بالاتر، حسگرهای موج‌جبهه (Wavefront Sensors) حساس‌تر و الگوریتم‌های کنترلی بهینه‌تر، امکان

جبران بهتر و سریع‌تر اثرات آشفتگی جوی را فراهم می‌کند. علاوه بر این، هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) می‌توانند نقش مهمی ایفا کنند [۳۷، ۳۸، ۴۳]:

- پیش‌بینی شرایط جوی: مدل‌های AI می‌توانند شرایط جوی و آشفتگی را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند تا عملکرد سیستم AO بهینه شود یا مسیرهای ارتباطی جایگزین انتخاب شوند.

- بهینه‌سازی بلادرنگ AO: الگوریتم‌های ML می‌توانند کنترل سیستم AO را به‌صورت بلادرنگ و تطبیقی با شرایط متغیر، بهبود بخشند.

- پردازش سیگنال هوشمند: AI می‌تواند به کاهش نویز و بهبود کیفیت سیگنال دریافتی در شرایط چالش‌برانگیز کمک کند.

۷-۴- به‌سوی استانداردسازی جهانی و قابلیت همکاری

جامعه فضایی به‌طور فزاینده‌ای بر اهمیت استانداردسازی جهانی و یکپارچه FSOC تأکید دارد تا بر چالش قابلیت همکاری (بخش ۶.۴) غلبه کند. تلاش‌های آینده باید بر موارد زیر متمرکز باشد:

- ایجاد چارچوب‌های مشترک: توسعه استانداردهایی که جنبه‌های کلیدی مانند طول‌موج، مدولاسیون، کدینگ، پروتکل‌های شبکه و واسط‌های فیزیکی را به‌صورت هماهنگ تعریف کنند.

- تعریف پروفایل‌های کاربردی: ایجاد پروفایل‌های استاندارد برای انواع مختلف مأموریت‌ها (LEO, GEO, Deep Space) که ضمن حفظ قابلیت همکاری پایه، امکان بهینه‌سازی برای نیازهای خاص را فراهم کند.

- تشکیل کنسرسیوم‌های بین‌المللی: همکاری نزدیک‌تر بین آژانس‌های فضایی، صنعت و نهادهای استانداردسازی (مانند CCSDS, SDA, ESA, ITU) برای تدوین و پذیرش استانداردهای جهانی

۷-۵- بهبود مقیاس‌پذیری و مدیریت خودکار با هوش مصنوعی

برای مدیریت مؤثر منظومه‌های بزرگ ماهواره‌ای (چالش بخش ۶.۳)، هوش مصنوعی نقش کلیدی در مدیریت شبکه خودکار و هوشمند ایفا خواهد کرد [۳۷، ۳۸].

• شبکه‌های یکپارچه زمین-فضا: FSOC می‌تواند نقشی کلیدی در اتصال یکپارچه شبکه‌های زمینی و فضایی ایفا کند. این جهت‌گیری‌های فناورانه، نویدبخش آینده‌ای هستند که در آن FSOC نقشی محوری در زیرساخت ارتباطات فضایی ایفا می‌کند و بسیاری از محدودیت‌های امروزی را پشت سر می‌گذارد.

۸- نتیجه‌گیری

مخابرات نوری فضای آزاد (FSOC) با ارائه مزایای بنیادین نسبت به فناوری‌های رادیویی سنتی، از جمله پهنای باند بسیار بالاتر، امنیت ذاتی بهبودیافته و کاهش قابل‌توجه در وزن، حجم و توان مصرفی تجهیزات، به‌عنوان یک فناوری دگرگون‌کننده در عرصه ارتباطات فضایی مطرح شده است. این فناوری پتانسیل آن را دارد که محدودیت‌های کنونی در انتقال داده‌ها را از میان بردارد و امکان تحقق مأموریت‌های فضایی پیچیده‌تر و کاربردهای نوین، از منظومه‌های عظیم ماهواره‌ای LEO گرفته تا اکتشافات علمی در اعماق فضا را فراهم سازد.

با این حال، همان‌طور که در این مقاله به تفصیل بحث شد، مسیر پیش روی FSOC خالی از چالش نیست. تأثیرات مخرب جو زمین، نیاز به سیستم‌های مکان‌یابی، اکتساب و ردیابی (PAT) با دقت فوق‌العاده بالا، پیچیدگی‌های مقیاس‌پذیری و مدیریت شبکه‌های نوری بزرگ، فقدان استانداردسازی جهانی یکپارچه، ملاحظات امنیتی و محدودیت‌های مربوط به بهره‌وری انرژی و هزینه، همگی موانعی هستند که باید برای پذیرش گسترده و عملیاتی شدن کامل این فناوری بر آن‌ها غلبه کرد.

تحلیل تطبیقی استانداردهای کلیدی ارائه‌شده توسط ITU، ESA، SDA، CCSDS و نشان داد که هر یک از این چارچوب‌ها با فلسفه و اهداف متفاوتی توسعه یافته‌اند و برای انواع خاصی از مأموریت‌ها مناسب‌تر هستند. CCSDS برای مأموریت‌های علمی و اعماق فضا که نیازمند حداکثر کارایی و قابلیت اطمینان هستند، ایده‌آل است. SDA بر مقیاس‌پذیری، هزینه پایین و قابلیت همکاری در منظومه‌های بزرگ LEO تمرکز دارد. ESA با چارچوب ESTOL، رویکردی تطبیق‌پذیر و پیشرو در ادغام فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های هیبریدی و QKD ارائه می‌دهد. در نهایت، ITU نقشی حیاتی در هماهنگی جهانی و مدیریت طیف ایفا می‌کند. این مقاله با ارائه یک

• مسیریابی هوشمند: الگوریتم‌های AI می‌توانند مسیرهای بهینه را در شبکه‌های پویا و پیچیده پیدا کنند.
• مدیریت خودکار لینک: تصمیم‌گیری هوشمند برای برقراری، حفظ و تغییر مسیر لینک‌ها بر اساس ترافیک شبکه و وضعیت لینک‌ها.
• بهینه‌سازی منابع: تخصیص پویای پهنای باند و توان بر اساس نیازهای متغیر.

• پیش‌بینی و تشخیص خطا: استفاده از ML برای پیش‌بینی خرابی‌های احتمالی (Predictive Maintenance) در ترمینال‌ها یا لینک‌ها

۶-۷- افزایش بهره‌وری انرژی

با توجه به محدودیت منابع انرژی در فضا (چالش بخش ۶-۶)، تلاش برای افزایش بهره‌وری انرژی سیستم‌های FSOC ادامه دارد [۴۴-۴۶]:

• توسعه لیزرها و آشکارسازهای کم‌مصرف: بهبود بازده قطعات اپتوالکترونیک کلیدی.
• الکترونیک کم‌توان: طراحی مدارهای مجتمع (ASICs) و پردازنده‌های بهینه‌شده برای کاربردهای FSOC.
• مدیریت هوشمند توان: الگوریتم‌هایی که توان مصرفی ترمینال را بر اساس کیفیت لینک و نیاز ترافیکی به‌صورت پویا تنظیم می‌کنند.

۷-۷- ادغام FSOC با زیرساخت‌های ارتباطی نوین

آینده FSOC تنها به ارتباطات نقطه‌به‌نقطه محدود نمی‌شود، بلکه شامل ادغام عمیق‌تر با سایر فناوری‌ها و زیرساخت‌های ارتباطی است [۴۶]:

• شبکه‌های غیرزمینی (NTN) نسل آینده (6G و فراتر): FSOC به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی برای ایجاد ستون فقرات پرسرعت در شبکه‌های ماهواره‌ای نسل آینده عمل خواهد کرد
• اینترنت اشیا (IoT) فضایی: اتصال حجم عظیمی از حسگرها و دستگاه‌ها در فضا یا از طریق ماهواره.
• رایانش ابری فضایی (Space Cloud Computing): ایجاد مراکز داده در فضا که نیاز به ارتباطات پرسرعت بین گره‌ها دارند.

۹- علائم و اختصارات

مخفف	عبارت کامل (فارسی/انگلیسی)
AO	Adaptive Optics (اپتیک تطبیقی)
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
DPSK	Differential Phase-Shift Keying
EMI	Electromagnetic Interference (تداخل الکترومغناطیسی)
ESA	European Space Agency (اژانس فضایی اروپا)
ESTOL	European Space Telecommunication Optical Link
FSOC	Free Space Optical Communication (مخابرات نوری فضای آزاد)
GEO	Geostationary Orbit (مدار زمین‌آهنگ)
IoT	Internet of Things (اینترنت اشیا)
ISL	Inter-Satellite Link (لینک بین ماهواره‌ای)
ITU	International Telecommunication Union (اتحادیه بین‌المللی مخابرات)
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LDPC	Low-Density Parity-Check
LEO	Low Earth Orbit (مدار پایین زمین)
LLCD	Lunar Laser Communication Demonstration
ML	Machine Learning (یادگیری ماشین)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NTN	Non-Terrestrial Network (شبکه غیرزمینی)
OOK	On-Off Keying
PAT	Pointing, Acquisition, and Tracking
PPM	Pulse-Position Modulation
QKD	Quantum Key Distribution (توزیع کلید کوانتومی)
RF	Radio Frequency (فرکانس رادیویی)
SDA	Space Development Agency (اژانس توسعه فضایی)
SWaP	Size, Weight, and Power (حجم، وزن و توان مصرفی)

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

از تمامی افرادی که جهت تدوین و تهیه این تحقیق قبول زحمت نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد و از مدیران نشریه و ویراستاران محترم بابت حمایت و کمک در نگارش مقاله سپاسگزارم.

مراجع

- [1] D. Caplan, "Laser communication transmitter and receiver design," *Journal of Optical Communications and Reports*, vol. 4, pp. 225–362, 2007, doi: 10.1007/s10297-006-0079-z.
- [2] H. Willebrand and B. S. Ghuman, *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2002.

راهنمای عملی برای انتخاب استاندارد (بخش ۵.۲)، به محققان و مهندسان کمک می‌کند تا بر اساس نیازمندی‌های مأموریت خود (نوع مدار، نرخ داده، برد، بودجه، سطح امنیت و پایداری موردنیاز)، آگاهانه‌ترین تصمیم را اتخاذ کرده و چالش‌های محتمل را پیش‌بینی کنند.

چشم‌انداز آینده FSOC روشن است و با پیشرفت در فناوری‌های نوظهور، امید به غلبه بر چالش‌های کنونی افزایش می‌یابد. توزیع کلید کوانتومی (QKD) امنیت بی‌نظیری را وعده می‌دهد. شبکه‌های هیبریدی نوری-رادیویی پایداری لینک‌ها را در شرایط جوی نامساعد افزایش می‌دهند. اپتیک تطبیقی پیشرفته و هوش مصنوعی به کاهش اثرات جوی و بهبود عملکرد PAT کمک می‌کنند. هوش مصنوعی همچنین نقشی کلیدی در مدیریت خودکار و هوشمند شبکه‌های پیچیده ایفا خواهد کرد. تلاش‌های مستمر برای افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه نیز ادامه دارد.

مهم‌تر از همه، استانداردسازی جهانی و تقویت همکاری‌های بین‌المللی برای تحقق کامل پتانسیل FSOC حیاتی است. ایجاد چارچوب‌های مشترک و یکپارچه که قابلیت همکاری بین سیستم‌های مختلف را تضمین کند، نه تنها باعث کاهش هزینه‌ها و پیچیدگی می‌شود، بلکه زمینه را برای ایجاد یک اکوسیستم جهانی FSOC فراهم می‌آورد.

در نهایت، این مقاله با ارائه تحلیلی جامع از وضعیت فعلی استانداردها، چالش‌ها و فرصت‌های پیش روی مخابرات نوری فضای آزاد، می‌کوشد تا به‌عنوان یک منبع مرجع و راهنما برای جامعه علمی و صنعتی فعال در این حوزه عمل کند. با سرمایه‌گذاری هدفمند در تحقیقات، توسعه فناوری‌های نوین و تلاش برای ایجاد استانداردهای جهانی، می‌توان اطمینان داشت که FSOC به‌زودی به یکی از ارکان اصلی و جدایی‌ناپذیر زیرساخت ارتباطات فضایی در قرن بیست و یکم تبدیل خواهد شد و مرزهای دانش و کاربردهای فضایی را بیش‌ازپیش گسترش خواهد داد.

- (Green Book), Issue 4, 2023. [Online]. Available: <https://public.ccsds.org>
- [17] CCSDS Secretariat, *Real-Time Weather and Atmospheric Characterization Data*, CCSDS 140.1-G-2 (Green Book), Issue 2, 2024. [Online]. Available: <https://public.ccsds.org>
- [18] CCSDS Secretariat, *Atmospheric Characterization and Forecasting for Optical Link Operations*, CCSDS 141.1-M-1 (Magenta Book), Issue 1, 2022. [Online]. Available: <https://public.ccsds.org>
- [19] Space Development Agency (SDA), *Optical Communications Terminal Standard*, Version 4.0.0, Office of the Under Secretary of Defense, 2024. [Online]. Available: <https://www.sda.mil/>
- [20] European Space Agency (ESA) and ESA Member States Industry, *ESA Specification for Terabit/Sec Optical Links (ESTOL)*, ESA-CSC-T-SP-0001, 2023. [Online]. Available: <https://www.esa.int/>
- [21] R. J. Alliss and B. Felton, "The mitigation of cloud impacts on free-space optical communications," in *Proc. SPIE 8380, Atmospheric Propagation IX*, 2012, Art. no. 83800S, doi: 10.1117/12.918403.
- [22] K.-J. Schulz and J. Rush, "Results of the optical link study group," in *Proc. SpaceOps Conf.*, 2012, doi: 10.2514/6.2012-1275004.
- [23] International Telecommunication Union (ITU), *Guidelines on Frequency Allocations for FSO Systems*, ITU-R Recommendations, 2022. [Online]. Available: <https://www.itu.int/>
- [24] International Telecommunication Union (ITU), *Guidelines on Frequency Allocations for FSO Systems*, ITU-T Recommendations, 2022. [Online]. Available: <https://www.itu.int/>
- [25] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 1–380, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2603518.
- [26] S. Zafar and H. Khalid, "Free space optical networks: Applications, challenges and research directions," *Wireless Personal Communications*, vol. 121, pp. 429–457, 2021, doi: 10.1007/s11277-021-08644-4.
- [27] A. Carrasco-Casado and R. Mata-Calvo, "Space optical links for communication networks," in *Springer Handbook of Optical Networks*, B. Mukherjee et al., Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 1–20, doi: 10.1007/978-3-030-16250-4_34.
- [28] R. Saiyyed et al., "Free space optical communication system: A review of practical constraints, applications, and challenges," *Journal of Optical Communications*, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, 2024, doi: 10.1515/joc-2024-0011.
- [29] Starlink satellite constellation. [Online]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/starlink> (accessed Nov. 2024).
- [3] V. W. S. Chan, "Free-space optical communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4750–4762, 2006, doi: 10.1109/JLT.2006.885252.
- [4] H. Kaushal, V. K. Jain, and S. Kar, *Free Space Optical Communication*. New Delhi, India: Springer, 2017.
- [5] H. Hemmati, Ed., *Deep Space Optical Communications*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2006.
- [6] A. Biswas, K. Andrews, R. Bondurant, and S. Piazzolla, "Overview of NASA's Lunar Laser Communication Demonstration (LLCD)," in *Proc. SPIE*, vol. 8971, 2014, Art. no. 89710A, doi: 10.1117/12.2045535.
- [7] D. M. Boroson, "Overview of the Lunar Laser Communication Demonstration," in *Proc. Int. Conf. Space Optics (ICSO)*, Kobe, Japan, 2014, pp. S1–S2, doi: 10.1117/12.2045508.
- [8] K.-J. Schulz, "CCSDS standardization in optical communication," presented at SkyLight Industry Day, Sep. 2017. [Online]. Available: <https://connectivity.esa.int/sites/default/files/08%20-%20Klas-Juergen%20ESA.pdf>
- [9] B. L. Edwards, R. Daddato, K.-J. Schulz, et al., "An update on the CCSDS optical communications working group interoperability standards," in *Proc. IEEE Int. Conf. Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, 2019, pp. 1–8, doi: 10.1109/ICSOS45490.2019.8978979.
- [10] B. Edwards, "Overview of the CCSDS optical communications interoperability standards," NASA Tech. Rep., 2021. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210016378>
- [11] B. Edwards, "Latest status of the CCSDS optical communications working group," in *Proc. IEEE Int. Conf. Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, 2022, doi: 10.1109/ICSOS53063.2022.9749734.
- [12] CCSDS Secretariat, *Optical High Data Rate (HDR) Communication—1064 nm*, CCSDS 141.11-O-1 (Orange Book), Issue 1, 2018. [Online]. Available: <https://public.ccsds.org>
- [13] CCSDS Secretariat, *Optical High Data Rate (HDR) Communication—1550 nm*, CCSDS 141.10-O-1 (Orange Book), Issue 1, 2022. [Online]. Available: <https://public.ccsds.org>
- [14] CCSDS Secretariat, *Optical Communications Physical Layer*, CCSDS 141.0-B-1 (Blue Book), Issue 1, 2019. [Online]. Available: <https://public.ccsds.org>
- [15] CCSDS Secretariat, *Optical Communications Coding and Synchronization*, CCSDS 142.0-B-1 (Blue Book), Issue 1, 2019. [Online]. Available: <https://public.ccsds.org>
- [16] CCSDS Secretariat, *Overview of Space Communications Protocols*, CCSDS 130.0-G-4

- [41] S. Pirandola, "Satellite quantum communications: Fundamental bounds and practical security," *Physical Review Research*, vol. 3, Art. no. 023130, 2021, doi: 10.1103/PhysRevResearch.3.023130.
- [42] J. S. Sidhu, "Advances in space quantum communications," *IET Quantum Communication*, 2021, doi: 10.1049/qtc.2.12015.
- [43] K. Abdelli, H. Grieser, and S. Pachnicke, "A machine learning-based framework for predictive maintenance of semiconductor lasers for optical communication," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 14, pp. 4698–4708, 2022, doi: 10.1109/JLT.2022.3163579.
- [44] A. Minbaleev and K. Evsikov, "Regulation of atmospheric optical quantum communication links," *E3S Web of Conferences*, vol. 541, Art. no. 02001, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202454102001.
- [45] X.-H. Huang *et al.*, "WDM free-space optical communication system of high-speed hybrid signals," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 6, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1109/JPHOT.2018.2881701.
- [46] M. Elamassie and M. Uysal, "Free space optical communication: An enabling backhaul technology for 6G non-terrestrial networks," *Photonics*, vol. 10, Art. no. 1210, 2023, doi: 10.3390/photonics10111210.
- [30] M. Jin, W. Liu, Y. Hao, R. Wu, Z. Wei, D. Deng and H. Liu, "Hybrid dual-hop RF/FSO terrestrial-deep space communication system under solar scintillation during superior solar conjunction," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, Art. no. 619, 2022, doi: 10.3390/app12020619.
- [31] C. Liu, M. Chen, S. Chen, and H. Xian, "Adaptive optics for the free-space coherent optical communications," *Optics Communications*, vol. 361, pp. 21–24, 2016, doi: 10.1016/j.optcom.2015.10.033.
- [32] R. Daoman, L. Chao, C. Mo, X. Hao, "Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station," *Opto-Electronic Engineering*, vol. 45, no. 3, Art. no. 170647, 2018, doi: 10.12086/oe.2018.170647.
- [33] T. Weyrauch and M. A. Vorontsov, "Free-space laser communications with adaptive optics: Atmospheric compensation experiments," *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, vol. 1, pp. 355–379, 2004, doi: 10.1007/s10297-005-0033-5.
- [34] A. Vettor, "Space systems for optical communications," Ph.D. dissertation, Università degli Studi di Padova, Padova, Italy, 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11577/3472994>
- [35] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, M. Zhou, and T. Zhang, "A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2804323.
- [36] D. He, Q. Wang, B. Qi, J.W. Zhou, Z.J. Song, W.S. Liu, D.J. Zhong, I.G. Ren, S.K. Liao, J. Yin, and Y.M. Huang, "Acquisition technology for optical ground stations in satellite-ground quantum experiments," *Applied Optics*, vol. 57, no. 6, pp. 1351–1358, 2018, doi: 10.1364/AO.57.001351.
- [37] K. Thangavel, R. Sabatini, A. Gardi, K. Ranasinghe, S. Hilton, P. Servidia, and D. Spiller, "Artificial intelligence for trusted autonomous satellite operations," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 144, Art. no. 100960, 2024, doi: 10.1016/j.paerosci.2023.100960.
- [38] F. Fourati and M.-S. Alouini, "Artificial intelligence for satellite communication: A review," *Intelligent and Converged Networks*, vol. 2, no. 3, pp. 213–243, 2021, doi: 10.23919/ICN.2021.0015.
- [39] S. G. Bavachkar, A. S. Shewale, R. R. Potdar, and R. R. Chavan, "Satellite quantum communication with cryptography," *Recent Innovations in Wireless Network Security*, vol. 1, no. 3, pp. 93–101, 2019.
- [40] L. de Forges de Parny, O. Alibart, J. Debaud, S. Gressani, A. Lagarrigue, A. Martin, A. Metrat, M. Schiavon, T. Troisi, E. Diamanti, and P. Gélard, "Satellite-based quantum information networks: Use cases, architecture, and roadmap," *Communications Physics*, vol. 6, Art. no. 12, 2023, doi: 10.1038/s42005-022-01123-7.