



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Systematic Analysis of Space Lidar Payload of Remote Sensing Satellites with Emphasis on the Effect of Environmental Parameters

M. Khoshsima^{*1}, S. Ghazanfarinia², R. Narimani²¹ Iranian space research center, Tehran, Iran² Satellite Research Institute, Iranian space research center, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 06 July 2024
Reviewed: 15 August 2024
Revised: 07 September 2024
Accepted: 05 October 2024

KEYWORDS:

Lidar
Remote Sensing Satellite
System Design
Signal to Noise
Zenith Angle

* Corresponding author

✉ m.khoshsima@isrc.ac.ir

☎ (+9821) 63190000

Background and Objectives: Remote sensing satellites equipped with Lidar payloads are deployed for ground, atmospheric, and space target monitoring missions. The primary advantage of space Lidars lies in their ability to conduct global monitoring with repeated coverage of targets, a capability that ground and airborne Lidars cannot fulfill. The energy of each pulse is a critical parameter in the design of space Lidar remote sensing payloads, impacting data accuracy, signal-to-noise ratio, horizontal and vertical resolution, and overall return signal aggregation time. Enhancing the signal-to-noise ratio is a key consideration in both the design and operational phases of a Lidar project. Numerous studies have explored the impact of different parameters on the signal-to-noise ratio of Lidar systems. However, despite these extensive investigations, this issue has not been comprehensively examined to date. The geometric configuration of the Lidar system, laser specifications, optics, electronics, and the arrangement of the laser-telescope geometry are key factors that significantly influence the optimization of the signal-to-noise ratio. Apart from the specifications of individual components, system analyses play a crucial role in the design of Lidar payloads. This includes technical specifications of the laser, transmitter, optical system, receiver telescope, heat control, and radiation considerations. Establishing a technical alignment between missions and payload specifications is a key requirement in this process.

Methods: Fully investigating the challenges associated with the systematic analysis of Lidar payloads is essential. This paper presents comprehensive research on the challenges and requirements related to the design considerations of Lidar systems, focusing on the transmitter and receiver components, as well as environmental factors such as radiation effects and thermal issues. Following the initial system analysis, further exploration is needed to address considerations for the Lidar payload during the operational phase, encompassing challenges related to data extraction, signal quality, and signal-to-noise ratio.

Findings: Variations in the sun's radiation angle can impact the optical depth parameter of aerosols, affecting the lidar signal-to-noise ratio by 10-40% based on atmospheric conditions. Optimal data collection times are estimated around zenith angles below 50 degrees at approximately 10 am and 2 pm, correlating with sun angle and atmospheric light scattering. Additionally, sunrise and sunset can influence signal-to-noise ratio due to maximum dispersion. The calculation of total ionizing dose damage serves as a design bottleneck, determining laser module efficiency loss through critical power index assessment for active and passive heat control. This article explores technical bottlenecks and systemic considerations in lidar payloads, investigating the role of environmental factors such as sun radiation angle and space environment impact.

Conclusion: The findings indicate that environmental factors such as space radiation and atmospheric optical indices during the operational phase, as well as geometric, structural parameters, and heat management during the design phase, significantly impact the energy of each pulse and variations in the signal-to-noise ratio. This insight is crucial for accurately estimating design budgets at both system and subsystem levels. The outcomes of this study not only offer practical implications for case studies but also suggest potential enhancements through the exploration and inclusion of additional considerations, potentially at the subsystem or other payload component levels. Leveraging the results of this research can help guarantee the precision of Lidar performance in future phases.



NUMBER OF REFERENCES
31



NUMBER OF FIGURES
13



NUMBER OF TABLES
6

مقاله پژوهشی

تحلیل سیستمی محموله لیدار فضایی ماهواره‌های سنجشی با تأکید بر اثر پارامترهای محیطی در طراحی و بهره‌برداری

مسعود خوش‌سیما^{۱*}، سجاد غضنفری‌نیا^۲، راضیه نریمانی^۲

^۱ پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: ماهواره‌های سنجشی دارای محموله‌های لیدار، با مأموریت‌های پایش اهداف زمینی، اتمسفری و فضایی طراحی و عملیاتی می‌شوند. شاخص اصلی برتری لیدارهای فضایی، پایش جهانی اهداف متعدد است که سکوه‌های زمینی و هوایی پاسخ‌گوی نیازهای دنیای امروز در این زمینه نمی‌باشند. یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی محموله‌های سنجش از دور لیدار فضایی، انرژی هر پالس می‌باشد که به‌طور مستقیم در دقت داده‌های جمع‌آوری شده، نرخ سیگنال به نویز، قدرت تفکیک افقی و عمودی و به عبارت دیگر، زمان تجمیع سیگنال بازگشتی، تأثیرگذار است. بهبود نرخ سیگنال به نویز به‌عنوان دیگر پارامتر مهم و مؤثر که هم در فازهای طراحی و هم در فاز بهره‌برداری مأموریت‌های لیدار دارای اهمیت است. در خصوص تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ سیگنال به نویز سامانه‌های لیدار، پژوهش‌های متعددی انجام شده است ولی علیرغم این تحقیقات گسترده، هنوز این موضوع به‌طور کامل بررسی نشده است. ساختار هندسی لیدار، مشخصات بخش‌های لیزر، اپتیک، الکترونیک، چیدمان هندسی لیزر-تلسکوپ از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار در بهینه‌کردن نرخ سیگنال به نویز می‌باشند. علاوه بر مشخصات زیرسیستم‌های تأثیرگذار بر این فرآیند، تحلیل‌های سیستمی در طراحی محموله لیدار که شامل بررسی مشخصات فنی لیزر، فرستنده، سامانه اپتیک، تلسکوپ گیرنده، کنترل حرارت و ملاحظات تشعشعی است، حائز اهمیت بوده و برقراری یک نگاهت فنی بین مأموریت‌ها و مشخصات فنی محموله از الزامات طراحی به‌شمار می‌رود.

روش‌ها: تحلیل سیستمی محموله‌های لیدار و طراحی یک محموله مطلوب دارای چالش‌های بسیاری است که نیاز به بررسی کاملی داشته و در دو فاز طراحی سیستمی و بهره‌برداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این مقاله، پژوهش گسترده‌ای روی این چالش‌ها و الزامات انجام شده است که ملاحظات طراحی شامل دو بخش فرستنده و گیرنده برای محموله لیدار، اثرات تشعشعی و مسائل حرارتی به‌عنوان پارامترهای محیطی است. پس از تحلیل‌های سیستمی اولیه، نیاز به بررسی ملاحظات محموله لیدار در فاز بهره‌برداری است که خود شامل بررسی چالش استخراج داده‌ها، کیفیت سیگنال و شاخص سیگنال به نویز می‌گردد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج، تغییرات زاویه تابش خورشید، که در افزایش یا کاهش پارامتر عمق اپتیک اپروسول‌ها در ساعات مختلف روز و به تبع آن، در زاویه زینت تأثیر دارد، بر اساس شرایط اتمسفر می‌تواند ۱۰ تا ۴۰٪ بر نرخ سیگنال به نویز لیدار مؤثر باشد. همچنین، در زوایای زینت زیر ۵۰ درجه و ساعات تقریبی ۱۰ صبح و ۲ بعدازظهر، زمان مناسبی برای داده‌برداری تخمین زده شده است که این امر کاملاً با زاویه تابش خورشید و میزان پراکنش نور در اتمسفر ارتباط دارد. همچنین، هنگام طلوع و غروب خورشید، با توجه به حداکثر بودن پراکنش، نرخ سیگنال به نویز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. محاسبه آسیب دوز یونیزان کل به‌عنوان یک گلوگاه طراحی، افت بازده عملکرد ماژول لیزر را تعیین نموده و با استفاده از شاخص بحرانی توان به وزن کنترل حرارت فعال و غیرفعال مشخص می‌گردد. در این مقاله، با تأکید بر گلوگاه‌های فنی محموله‌های لیدار و ملاحظات که در بخش‌های مختلف از دیدگاه سیستمی وجود دارد، نقش عوامل محیطی مانند تأثیر زاویه تابش خورشید و محیط فضا بر یک محموله لیدار، بررسی شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج، نشان می‌دهد پارامترهای محیطی شامل تشعشعات فضایی، تغییرات اپتیک و تابشی اتمسفر در فاز بهره‌برداری و جانمایی‌های هندسی و سازه‌ای و کنترل حرارت در فاز طراحی در میزان انرژی هر پالس و تغییرات نرخ سیگنال به نویز مؤثر هستند و باعث دقت در تخمین بودجه‌های طراحی در سطح سیستم و زیرسیستم خواهد

تاریخ دریافت: ۱۶ تیر ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۲۵ مرداد ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۱۷ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴ مهر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

لیدار
ماهواره سنجشی
طراحی سیستمی
سیگنال به نویز
زاویه زینت

* نویسنده مسئول

m.khoshsimā@isrc.ac.ir

① ۰۲۱-۶۳۱۹۰۰۰۰

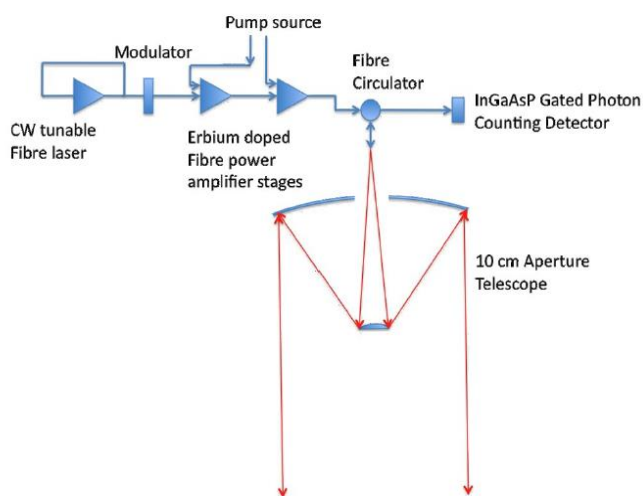
شد. نتایج این تحقیق نه تنها می‌تواند برای بهره‌برداری در مطالعات موردی کارگشا باشد، بلکه امکان تکمیل دستاوردهای این تحقیق با بررسی و افزودن ملاحظات دیگر و همچنین توسعه آن‌ها در سطح زیرسیستم‌ها یا المان‌های دیگر محموله نیز وجود دارد. به کمک نتایج این بررسی می‌توان از صحت عملکرد لیدار در فازه‌ای آتی اطمینان حاصل نمود.

مقدمه

خواهد شد. علاوه بر این ارتفاع مداری ماهواره دارای محموله لیدار، بر روی سایز تلسکوپ و میزان نرخ سیگنال به نویز مؤثر است.

بهبود نرخ سیگنال به نویز به‌عنوان یک پارامتر اصلی هم در فازه‌های طراحی و هم در فاز بهره‌برداری پروژه لیدار دارای اهمیت است. در خصوص تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ سیگنال به نویز سامانه‌های لیدار، پژوهش‌های متعددی انجام شده است [۲-۹] ولی علیرغم این تحقیقات گسترده، جنبه‌هایی از موضوع مغفول مانده و نیاز به بررسی بیشتری در این خصوص وجود دارد.

از عوامل مهم و تأثیرگذار در بهینه کردن نرخ سیگنال به نویز می‌توان به ساختار هندسی لیدار، مشخصات بخش‌های لیزر، اپتیک، الکترونیک، چیدمان هندسی لیزر-تلسکوپ اشاره نمود. بر این اساس و مطابق با استاندارد فضایی اروپا محدودیت‌های فنی برای رسیدن به نرخ سیگنال به نویز مناسب در محموله‌های لیدار عبارتند از: الزامات زیرسیستم‌های تلسکوپ، آشکارساز و پردازش.



شکل ۱: ساختار کلی یک محموله لیدار [۱۰]
Fig. 1: General structure of a Lidar payload [10]

یک سامانه لیدار در ساده‌ترین حالت از یک فرستنده لیزر، تلسکوپ جمع‌کننده و یک آشکارساز تصویر تک پیکسلی (سامانه اپتیکی) تشکیل می‌شود (شکل ۱). در این حالت، لیزر یک پالس را در راستای تلسکوپ ارسال کرده و این پالس از سطح هر جسمی که در مسیر باشد، باز خواهد گشت. این امواج بازگشتی توسط تلسکوپ بر روی آشکارساز متمرکز می‌شود. فاصله ماهواره با جسم، بر اساس زمان ارسال و زمان بازگشت امواج لیزر و در نظر گرفتن سرعت انتشاری برای با سرعت نور قابل اندازه‌گیری خواهد بود. در چنین سیستمی، تنها اجسامی که در راستای تلسکوپ ماهواره قرار داشته باشند، شناسایی خواهند شد و برای ساخت دیگر اجرام لازم است که سنجنده و تلسکوپ به‌صورت فیزیکی

ماهواره‌های سنجشی دارای محموله‌های لیدار، با مأموریت‌های پایش اهداف زمینی، اتمسفری و فضایی (اندازه‌گیری میزان رطوبت موجود در جو، ارتفاع و سرعت ابر، نمایه‌های باد، دما و دمای پتانسیلی، نقشه‌برداری و ترکیبات شیمیایی اتمسفر) به فضا پرتاب می‌شوند. محموله لیدار با استفاده از فناوری سنجش از دور فعال، دارای یک زیرسیستم لیزر برای ارسال امواج، زیرسیستم الکترواپتیک برای دریافت پرتوهای بازگشتی و بخش الکترونیک پردازش داده‌ها می‌باشد. مهم‌ترین کاربرد لیدارهای فضایی در مطالعات اتمسفری و علوم زمین شامل اندازه‌گیری سرعت باد، بخار آب، توپوگرافی و اقیانوس‌شناسی بوده و متناسب با هر یک، مشخصات، الزامات فنی و گلوگاه‌های طراحی متفاوتی وجود دارد که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود. محموله‌های لیدار معمولاً بر روی پلتفرم‌های فضایی، هوایی و زمینی نصب می‌شوند. لیدارهای زمینی پایه فقط یک نقطه ثابت و مشخص از هدف را به‌صورت پیوسته پایش می‌کنند [۱]. لیدارهای نصب شده بر روی هواپیما، دارای محدودیت پایش و رصد یک منطقه خاص هستند و همچنین، محدودیت‌های سیاسی و شرایط اتمسفری بر روی عملکردشان تأثیرگذار است.

شاخص اصلی برتری لیدارهای فضایی بر سایر سکوها، پایش جهانی با تکرار متعدد اهداف می‌باشد. اگر چه هزینه‌های زیاد و سطح فناوری بالا از موضوعات قابل بحث در این زمینه است، ولیکن با توجه به چالش‌های مهم پیش‌رو در دنیای امروز نظیر نقشه‌برداری، ارتفاع و عمق‌سنجی، پایش یخ‌های قطبی، تغییر اقلیم، ریزگردها، لایه اوزون، چرخه دی‌اکسیدکربن و بخار آب، از یک سو و اندازه‌گیری‌ها و انجام پروژه‌های تحقیقاتی با مقیاس‌های زمانی و مکانی بزرگ از سوی دیگر، لیدارهای نصب شده بر روی سکوها زمینی و هوایی نمی‌توانند پاسخ‌گوی این نیازهای جهانی باشند.

یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی محموله‌های سنجش از دور لیدار فضایی، طراحی انرژی هر پالس است که توسط منبع گسیلنده موج تأمین می‌شود و با نوع مأموریت و الزامات فنی سامانه لیدار نظیر چیدمان هندسی لیدار، لیزر و تلسکوپ مرتبط است. میزان مناسب انرژی هر پالس با در نظر گرفتن پارامترهای مداری می‌تواند در تعریف مأموریت که جمع‌آوری داده از سطح زمین و اتمسفر می‌باشد، مؤثر باشد [۲]. انرژی هر پالس محموله لیدار، به‌طور مستقیم در دقت داده‌های جمع‌آوری شده، نرخ سیگنال به نویز، قدرت تفکیک افقی و عمودی و به‌عبارت دیگر، زمان جمع‌سیگنال بازگشتی، تأثیرگذار است.

مطابق با استانداردهای سنجش از دور، افزایش نرخ سیگنال به نویز موجب اخذ بیشتر و کیفیت بالاتر داده‌ها و به تبع آن نیاز به تلسکوپ بزرگتر و در نهایت گسیلنده قوی‌تر به منظور افزایش انرژی هر پالس

شکل طول موج لیزرهای قابل استفاده در مأموریت‌های اندازه‌گیری لیدار نیز آمده است.

بر اساس مطالعات صورت گرفته، هفت دسته فناوری برای لیزر در نظر گرفته می‌شود. اما برای سادگی و همچنین پوشش تمامی مواردی که احتمالاً در آینده نیز ایجاد خواهند شد، در این مطالعه، دسته‌بندی‌ها به صورتی انجام گرفته که از تکرارها پرهیز شود، که بر این اساس تم‌های تولید هارمونیک‌ها یکپارچه شده و تبدیل پارامتریک طول موج‌ها به عنوان یک دسته جداگانه مطرح شده است [۱۳]. کلاس دیگری هم برای پوشش لیزرهایی که برای سیستم‌های تقویت‌کننده/نوسان‌ساز اصلی و کنترل عرض خط تبدیل فرکانس مدنظر است، لحاظ شده است. در نهایت، دسته‌بندی لیزرها عبارت است از:

- لیزرهای کلاس mJ و $1\text{-}\mu\text{m}$
- لیزرهای کلاس J و $1\text{-}\mu\text{m}$
- لیزرهای ۱ تا ۱۰۰ واتی و $1.5\text{-}1.6\ \mu\text{m}$
- لیزرهای دیودی تقویت‌کننده
- تولید طول موج‌های پارامتری

کاربردهای این دسته‌بندی به شرح شکل ۳ خواهد بود. در این شکل، تعداد مواردی که اندازه‌گیری به کمک این دسته‌بندی از لیزرها انجام شده و الزامات مأموریتی پوشش داده شده، ارائه گشته است.

با توجه به سناریوهای مأموریتی و همچنین دسته‌بندی ارائه شده برای لیزرها، بیشترین کاربرد مربوط به کلاس یک است که در آن لیزرهایی با طول موج پایین‌تر و انرژی به مراتب بالاتر قرار گرفته‌اند. برخی از نیازهای کلی تعریف شده توسط کاربران برای این محموله‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است. در این جدول فناوری راهگشا و الزامات آن نیز آمده است.

نشانه‌روی شوند [۱۰]. البته ملاحظات طراحی محموله‌های لیدار تنها به بخش فضایی بازمی‌گردد، بلکه علاوه بر فرستنده و گیرنده آن در ماهواره، المان‌های دیگری از جمله محیط نیز بر روی طراحی این محموله و کارکرد آن تأثیر بالایی دارند.

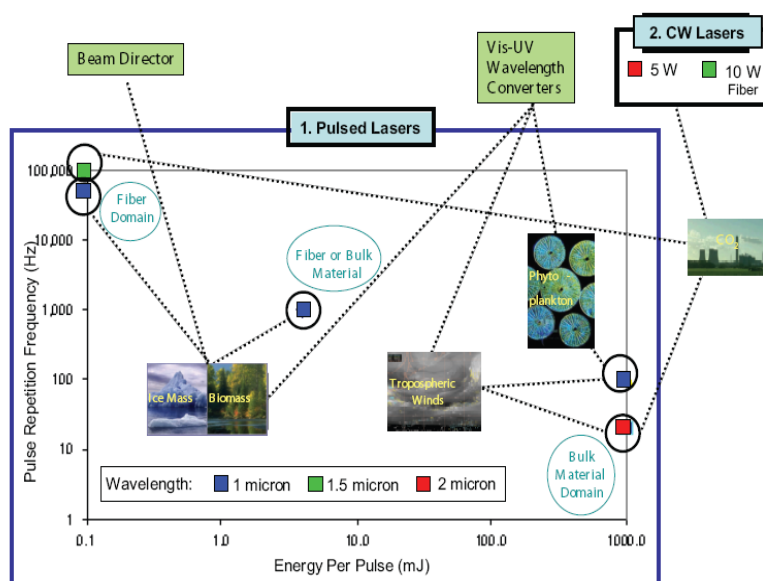
در این پژوهش، ابتدا ملاحظات و عوامل مؤثر نرخ سیگنال به نویز در فاز طراحی و بهره‌برداری محموله لیدار بررسی شده و سپس با تأکید بر فاز بهره‌برداری و داده‌برداری، در مورد تأثیر تغییرات زاویه زینت به عنوان یک عامل مهم در زمان اندازه‌گیری سیگنال لیدار با استفاده از داده‌های واقعی میدانی تحلیل خواهد شد.

تحلیل سیستمی در طراحی محموله لیدار

محموله لیدار از دیدگاه سیستمی در ساده‌ترین حالت از یک فرستنده لیزر، تلسکوپ جمع‌کننده و یک آشکارساز تصویر (سامانه اپتیکی) تشکیل می‌شود. ملاحظات طراحی محموله‌های لیدار که به صورت سیستمی بررسی و تحلیل می‌شود، شامل ملاحظات طراحی در دو بخش فرستنده و گیرنده برای محموله لیدار، اثرات تشعشعی و مسائل حرارتی به عنوان پارامترهای محیطی بوده و در ادامه بررسی شده است [۱۱ و ۱۲].

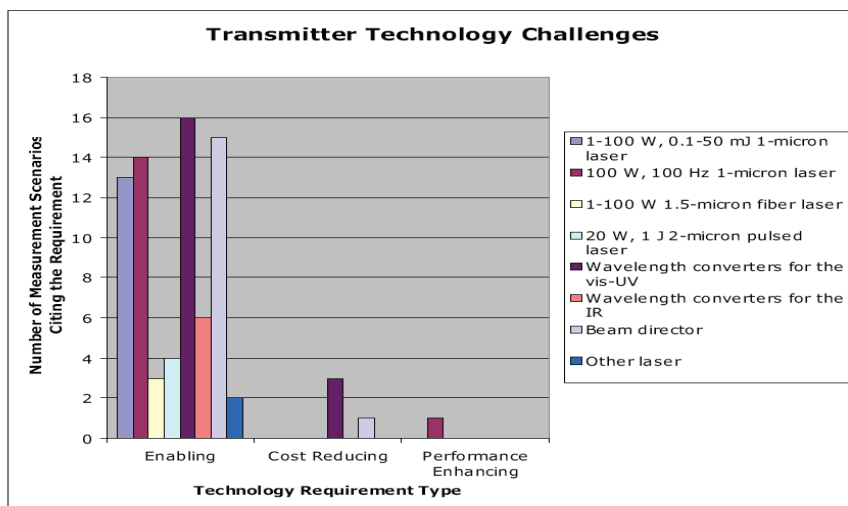
الف) ملاحظات فرستنده

اولین گام در تحلیل سیستمی یک محموله لیدار، تعیین قابلیت‌های مورد نیاز فرستنده است. از این رو، با توجه به کاربردهای مدنظر (سناریو مأموریت اندازه‌گیری)، مقدار انرژی هر پالس تشعشع شده از محموله به همراه فرکانس تکرار آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۲، ارتباط بین کاربردها، انرژی هر پالس و فرکانس تکرار را نشان می‌دهد [۱۳]. در این



شکل ۲: بررسی کاربردی فرستنده در محموله لیدار [۱۳]

Fig. 2: Application investigation of the transmitter in a Lidar payload [13]



شکل ۳: بررسی کاربردی انواع دسته‌بندی لیزرها در فرستنده [۱۳]

Fig. 3: Practical examination of the laser's classification in the transmitter [13]

جدول ۱: نیازهای مأموریتی برای کلاس اول لیزرها- الزامات فنی لیزر متناسب با سناریوهای اندازه‌گیری [۱۴]

Table 1: Mission requirements for the first class of lasers - Laser technical requirements tailored to measurement scenarios [14]

Measurement	Technology	State-of-the-Art	Requirements	Development Need
Topography, aerosol and temp. profiles	Pulse Rate \leq 500 Hz, Solid-state Laser	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, ≥ 0.25 J @ 150-Hz PRF, WPE \sim 10%, 1-MHz linewidth, $M^2 < 1.5^a$	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, 0.5 J @ 50-Hz PRF, WPE 6%, 1-MHz linewidth, $M^2 < 1.5$	Reliability, packaging, space qualification
Topography, aerosol and temp. profiles	Pulse Rate \geq 1 kHz, Solid-state Laser	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$: 1) bulk , ≥ 0.8 J @ 5 kHz PRF, WPE $> 5\%$ ^b ; 2) fiber , > 1 -4 mJ @ 10 kHz, WPE $> 15\%$, GHz linewidth, $M^2 < 1.5^c$	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, ~ 100 's μJ @ ≥ 2.5 -kHz PRF, WPE 6%, 1-MHz linewidth, $M^2 < 1.5$	Reliability, packaging, space qualification
Gravity	cw Solid-state Single Frequency Laser	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, ~ 15 kW, WPE $\sim 10\%$, ~ 100 -kHz linewidth, $M^2 < 1.5^d$	$1 \mu\text{m}$, ≥ 20 mW, sub-Hz linewidth ^e	GRACE-FO is focused on demonstration of frequency reference, incl. locking scheme
Atmospheric Composition, winds, ocean mixing-layer	Frequency Conversion	See "Fixed Wavelength Conversion" and "Tunable Wavelength Conversion" sections	Harmonic generation of 532, 355 nm; parametric generation to fixed and tunable λ 's Vis-MWIR*	Improved nonlinear optical materials and anti-reflective coatings
Topography, aerosol and T, oceanography	Fiber/Hybrid (bulk+fiber)*	10-100+ W at $1 \mu\text{m}$ (typically < 1 mJ), PRF 20- >100 kHz, $M^2 \sim 1$, WPE $\geq 20\%$	1, 1.5, 2 μm , ~ 0.1 -few mJ @ ≥ 2.5 -kHz PRF, WPE $\geq 15\%$, range of linewidths, $M^2 < 1.5$	Fiber-integrated components, low-nonlinearity gain fiber, higher WPE pump diodes
High resolution aerosol, $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$, oceanography	Single λ signal laser diodes, amplifiers	10 kHz-few MHz linewidth, 20-100 mW P_{ave}	Linewidth from kHz to MHz at variety of λ in Vis-SWIR range	Linewidth in ~ 10 kHz range, wavelengths $>$ telecom

سایر الزامات فنی اندازه‌گیری‌ها (محدود به فرستنده لیزر) در جدول ۲ بیان شده است.

(ب) ملاحظات گیرنده

در بحث گیرنده نیز مشابه فرستنده، تحلیل‌ها در ترکیب کاربردها، طول موج لیزر و عوامل دیگر مؤثر بر گیرندگی در محموله لیدار، بررسی شده و در یک شکل به صورت مجتمع ارائه می‌شود (شکل ۴). مشاهده می‌شود که در کنار گیرنده، مسائل محیطی و نشانه‌روی نیز دارای اهمیت بسیار هستند.

با توجه به جدول ۱، پس از کلاس یک، کلاس فناوری تبدیل طول موج ثابت، کلاس آخری که بنا به پوشش کامل نیازها و مشخصات افزوده شد، بیشترین کاربردها را به خود اختصاص داده بود. بر این اساس، جدولی مشابه برای این کلاس نیز تهیه شده و به صورتی که در جدول ۲ آمده، ارائه می‌شود.

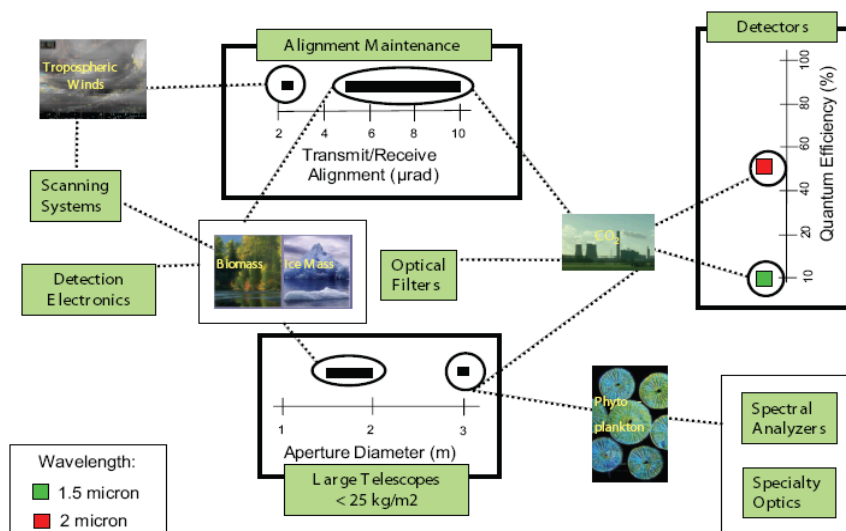
به‌عنوان مثال به‌منظور بررسی و اندازه‌گیری توپوگرافی و ایروسول‌ها، فناوری لیزر حالت جامد با انرژی متوسط هر پالس ۰/۵، نرخ تکرار فرکانس ۵۰ هرتز و بازه تبدیل انرژی ۶٪ در نظر گرفته شده است و در طرف مقابل برای اندازه‌گیری میدان‌های گرانشی از لیزر پیوسته حالت جامد با انرژی متوسط ۲۰ مگاوات و طول موج ۱ میکرومتر قرار دارد.

جدول ۲: نیازهای مأموریتی کلاس پنجم لیزرها [۱۴]

Table 2: Mission requirements of the fifth class of lasers [14]

Measurement	Technology	State-of-the-Art	Requirements	Development Need
Aerosol, H ₂ O _(v) , T, oceanography (at 532 nm w/ less penetration than ~450-480 nm)	Second Harmonic Generation	~70% 1064nm → 532 nm (>24 W @ 150 Hz, P _{pk} = 16 MW) ^a ; >50%, 1064nm → 532 nm (>200 W)	>100 mJ @ 532 nm, 10-200 Hz PRF; 2-5 mJ @ 532 nm, 2.5-20 kHz PRF	Incremental performance and reliability improvements
O ₂	Second Harmonic Generation	>50% 1530 nm → 765 nm	1 J, 10 Hz.	Scale telecom technology lasers to much higher energy
DWL; aerosol and T profiles	Third Harmonic Generation	~6 W, ~50% 1064+532 → 355 nm (20 kHz, P _{pk} ~1 MW); ~20+% at 150-300 Hz PRF	~6 W, ~30% 1064+532 → 355 nm (200 Hz, P _{pk} ~10 MW)	High efficiency, high reliability UV generation

^a Albert et al. [2015].



شکل ۴: الزامات فنی زیرسیستم گیرنده (سامانه اپتیکی) محموله لیدار متناسب با نوع مأموریت اندازه‌گیری [۱۴]

Fig. 4: Technical requirements of the receiver subsystem (optical system) of the Lidar according to the type of measurement mission [14]

ترسیم نمود. این گراف در شکل ۵ به نمایش در آمده است که بر اساس آن، برای سناریوهای پرکاربرد که به صورت اندازه‌گیری پارامترهای مختلف تعیین شده، فناوری‌ها به شرحی که در جدول ۵ آمده است، مورد نیاز خواهد بود. جزئیات هر فناوری نیز در جدول ۵ و به صورتی مشابه با جدولی که برای فرستنده ارائه شده بود، جمع‌بندی شده است.

متناسب با جدول ۴ (ابعاد سامانه اپتیکی و تلسکوپ- زیر سیستم گیرنده)، تلسکوپ با قطر ۳ متر برای اندازه‌گیری CO2 و ازون، یک چالش طراحی سیستمی محسوب می‌شود به طوری که در مورد توپوگرافی، ایروسل‌ها و باد این مسأله حدود ۱ متر برآورد شده است. همچنین، میدان دید ۱۰۰ میلی‌راد بیان CO2 و در مقابل ۰/۵ میلی‌ایروسل‌ها قابل مقایسه می‌باشد.

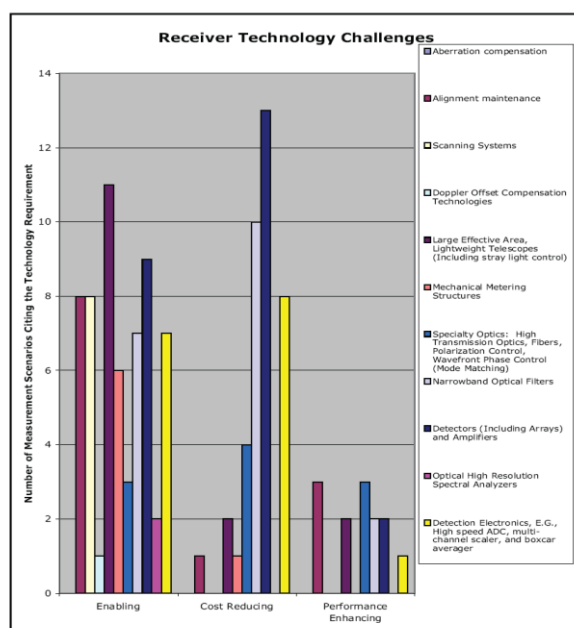
اختلاف زیاد قابلیت‌ها در فناوری‌های مختلف گیرنده‌ها، بر اندازه‌گیری تأثیرگذار بوده و موجب محدودیت در برخی کاربردها خواهد شد. برخی از این موارد در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس مطالعاتی که خلاصه آن‌ها در شکل ۴ ارائه شد، کلاس‌های زیر قابل بررسی هستند [۱۴]:

- نگهداشت تراز
 - سیستم‌های اسکن، سطح مؤثر بزرگ، تلسکوپ سبک، موضوعات مکانیکی، اپتیک فیلترهای نازک باند
 - آشکارسازها و تقویت‌کننده‌ها، آنالیزورهای طیفی با رزولوشن اپتیکی بالا، الکترونیک آشکارساز
- در مورد گیرنده نیز مشابه فرستنده، می‌توان گرافی بین موضوعات مطرح شده، کاربرد و ملاحظات سیستمی مرتبط به محموله لیدار

جدول ۳: مشخصات محدودیت‌های ایجاد شده ناشی از اختلاف قابلیت‌های فناوری [۱۴]

Table 3: Limitations caused by differences in technological capabilities [14]

Capability Gap	Measurements	Current TRL	"Greatest Challenge" TRL
High-efficiency detectors in 1.5-2 μm range	CO ₂ (ASCENDS)	5	Space qualification/radhard assurance
Field-widened interferometric receiver	Aerosol/Clouds/Ecosystems (ACE)	4	Wavefront error
High-bandwidth, high-sensitivity detector arrays	3D Biomass (NISAR/GEDI, formerly DESDynI)	5	N/A
None	Gravity (GRACE-2)	6	N/A
Multiple aperture/beam receiver	Topography (LIST in 2007 Decadal)	3	Large-area detector with high readout bandwidth
Single telescope supporting multiple look angles	3D Winds	3	Large-aperture receive optics (HOE/DOE, interferometer)



شکل ۵: بررسی کاربردی انواع دسته‌بندی لیزرها در گیرنده [۱۴]

Fig. 5: Practical examination of the classification of lasers in the receiver [14]

جدول ۴: کاربردها در کنار فناوری‌های مربوطه و الزامات آن‌ها از دیدگاه گیرنده [۱۴]

Table 4: Applications, related technologies and their requirements from the receiver's point of view [14]

Measurement	Technology	State-of-the-Art	Requirements	Development Need
Wind, Aerosols	Beryllium or SiC field lens-corrected Ritchey-Chrétien or other Cassegrain receive telescope	Single aperture, 1-1.5 m, ~0.2-0.5 mrad FOV	Light-weight telescopes >1 m	Light-weight, deployable telescopes >2-m diameter*
Aerosol, Ocean, Non-CO ₂ , Phytoplankton			2-5 m primary mirror telescope for space based lidar, <F/1 primary, <100- μ m blur circle, high transmission (>95%) at target wavelength(s), low thermal distortion, high rigidity	
Topography			1 - 1.5 m diameter, <10- μ rad blur circle	
CO ₂ , Ozone	3-m diameter deployable, ~100-mrad FOV, areal density <25 kg/m ²			
	Deployable large aperture diffractive primary and corrector optics ^a	Sub-aperture elements of 5-m primary used for imaging		

پوشش‌های حرارتی در سطوح مختلف، تأثیر بسیار زیادی بر پایداری حرارتی نهایی محموله لیدار دارد [۱۹ و ۲۰]. به‌طور کلی آزمون‌های محیطی حرارتی، با توجه به شرایط عملکردی محموله لیدار طراحی و اجرا می‌شود. در حالت عملکردی، بازه دمایی پیشنهادی برای تست حرارتی محیطی ۱۰+ درجه به حد بالا و ۱۰- درجه به حد پائین افزوده می‌شود. سیکل‌های حرارتی نیز متناسب با نوع قطعات و ماژول‌ها، برای تست تعریف و اجرا می‌شوند. به‌عنوان مثال برای تجمیع با قابلیت اطمینان بالا، ۶۰ سیکل، برای تجمیع پرخطر ۳۰ سیکل، برای زیرسیستم اپتو الکترونیک ۱۰۰ سیکل و بیشتر طراحی و اجرا می‌گردد.

شکل ۶ بررسی‌های انجام شده در خصوص ماژول لیزر پرکاربرد در لیدارهای فضایی را نشان می‌دهد. طراحی زیر سیستم کنترل حرارت در یک محموله لیدار با شاخص POWER to Weight بررسی می‌شود. این شاخص، بیان می‌کند هر چه نسبت توان به وزن لیزر بیشتر باشد، حرارت بیشتری در محفظه لیزر ایجاد می‌شود که می‌بایست از سیستم لیدار حذف شود و هرچه این شاخص کمتر باشد، انباشت گرمای کمتری در محفظه ایجاد می‌شود.

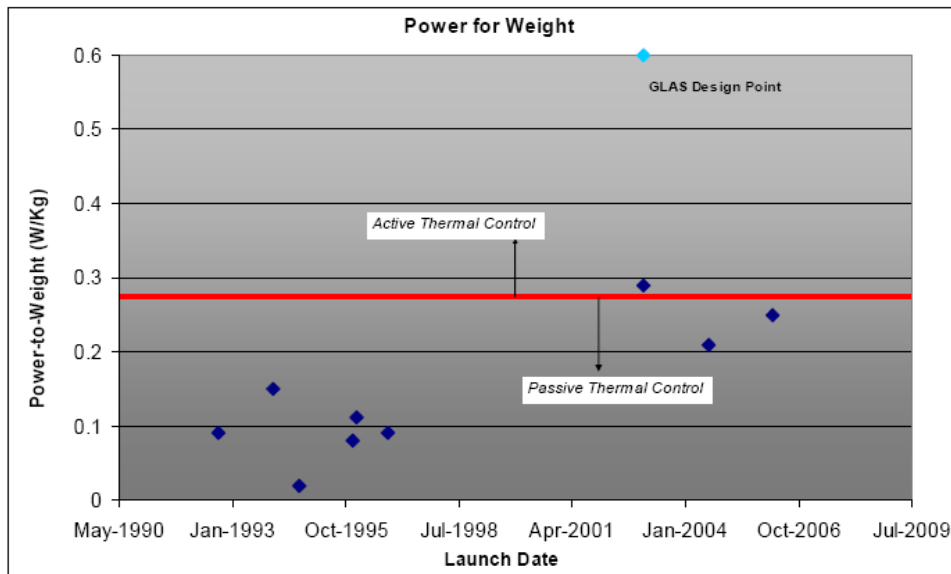
مطابق با بررسی‌های صورت گرفته، شاخص میانگین حدودی ۰/۲۹ برای معیار کنترل حرارت فعال و غیرفعال تعریف شده است. اگر ضریب P-W بالای این عدد باشد کنترل حرارت ماهواره می‌بایست با استفاده از فناوری فعال طراحی شود. به‌عنوان مثال این شاخص برای ماهواره لیداری GLAS حدود ۰/۶ می‌باشد.

توجه به این نکته ضروری است که گرم شدن و افزایش دمای لیزر و دیودهای پمپی آن، موجب کاهش بازده لیزر می‌شود. استفاده از آرایه‌های دیودی پمپی به‌جای دیودهای خطی در یک ماژول فضایی لیزر باعث افزایش ۳ تا ۵ درصدی راندمان کلی لیزر می‌گردد [۲۱].

ج) ملاحظات حرارتی و کنترل حرارت

بررسی آثار اپتوترمال، تعیین حد آستانه آسیب‌های اپتیکی، بررسی ملاحظات حرارتی محیط بهره و پمپ، سیستم‌های سرمایش، سیستم‌های جبران‌ساز، طراحی بهینه شامل بازده بالا و تولید پرتو با کیفیت، ساختار اپتیکی، انتخاب مواد، طراحی سازه، طراحی سناریو، تجمیع اپتیکی و مدیریت حرارتی از نکات مهم گلوگاه‌های طراحی لیزر محموله لیدار از دیدگاه حرارتی می‌باشد [۱۸-۱۶]. سایر موارد عبارتند از:

- ایجاد محیط همگن و پایدار از نظر حرارتی در اطراف محفظه لیزر، بر دهانه الکترونیکی و کاواک تلسکوپ
- استفاده از پوشش‌های MLI برای عایق‌بندی تبادل حرارتی محموله با محیط خارج و جلوگیری از تغییر دما ناشی از تشعشعات تابشی محیط فضا
- ایجاد رسانش ضعیف حرارتی در آینه‌ها و اتصالات
- رعایت ملاحظات و استانداردهای حرارتی اجزا
- استفاده از لوله‌های حرارتی
- استخراج بازه حرارتی مناسب
- عملکرد مناسب قطعات و خروجی قابل قبول در بازه حرارتی معین
- محاسبه و شبیه‌سازی توزیع حرارتی، خمش، تنش
- کنترل حرارت در اتصالات و انتخاب اتصال حرارتی مناسب در قطعات و عناصر اپتیکی و الکترواپتیکی
- مدیریت چرخه حرارتی در یک محموله توسط زیرسیستم کنترل حرارت شامل: عایق کردن یا مجزا کردن شاسی اپتیکی از منابع گرمایی و حرارتی و کمینه کردن تمامی گرادیان‌های حرارتی می‌باشد. عدسی‌ها، آینه‌ها، گسیلنده پرتو و همه اتصالات به‌کار رفته در سامانه اپتیک لیدار می‌بایست الزامات حرارتی را طی کرده باشند. خواص ترمواپتیکی



شکل ۶: مرور مشخصات حرارتی محموله‌های لیدار در گذر زمان [۲۱]

Fig. 6: Thermal characteristics review of Lidar payload over time [21]

هیترهای فعال حفظ می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی حرارتی ماهواره و محموله لیدار، بازه حرارتی محیطی، مشخصات هندسی و ترموپاتیکی نشان می‌دهد که بازه نوسانات دمایی قبل از اعمال طراحی حرارتی در حالت سرد و در یک مدار، حدود ۱۴ درجه بوده و بعد از آن به حدود ۵ درجه کاهش یافته است. در شرایط گرم مداری نیز، بعد از طراحی حرارتی، شرایط دمایی بسیار بهبود یافته و حداکثر دمای عملکردی حدود ۲۷ درجه، متوسط دمایی حدود ۲۲ درجه و نوسانات دمایی نیز ۲۱ درجه کاهش یافته است.

در بررسی دمای یک گیرنده پس از اعمال طراحی‌های حرارتی توسط خوش سیما و همکاران در [۲۲]، افزایش دمایی قابل توجهی در شرایط سرد اتفاق افتاده است که البته همچنان در محدوده مجاز قرار گرفته است. این درحالی است که در شرایط گرم بعد از اعمال طراحی حرارتی تغییر زیادی در دمای گیرنده روی نداده است. در مورد بازتابنده شرایط کاملاً متفاوت بوده به نحوی که حداقل دما در شرایط سرد ۴۲ درجه افزایش و حداکثر دما در شرایط گرم ۷ درجه کاهش داشته است. ضمن این‌که تغییرات دمایی نیز در هر دو حالت یکنواخت‌تر شده است.

بر اساس استاندارد فضایی اروپا [۲۳]، الگوریتم‌های کمینه کردن انحراف حرارتی یک سامانه اپتیکی عبارتند از:

- استفاده از طراحی‌هایی که تغییر شکل سازه سامانه لیدار تأثیری بر مسیر اپتیکی پرتو لیزر نداشته باشد و همراستایی اولیه برای عبور و گسیل پرتو لیزر دستخوش تغییر نشود.
- استفاده از آلیاژهای ترکیبی مقاوم در برابر انبساط حرارتی
- استفاده از مواد و عناصر با ضریب حرارتی انبساطی پائین
- رعایت ملاحظات مسیر اپتیکی و مقیاس اپتیکی مناسب و بهینه در سامانه لیدار [۲۴]

در خصوص ماهواره‌هایی با محموله‌های مشابه لیدار با لیزر ND:YAG و پمپاژ دیودی در دنیا (و به صورت خاص پروژه‌های ناسا) مطالعات زیادی انجام شده است. زیرسیستم کنترل حرارت ماهواره MOLA (تاریخ پرتاب ۱۹۹۵) از هیتر و ترموستات تشکیل شده است. در ماهواره گلاس این زیرسیستم از سه سری لوله‌های حرارتی بسته و در ماهواره‌های MLA و LOLA (تاریخ پرتاب ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲) از هیتر و ترموستات حرارتی تشکیل شده است. ماهواره CALIPSO (تاریخ پرتاب ۲۰۰۶) نیز از هیترهای کنترل‌کننده فعال و پوشش‌های عایق حرارتی MLI استفاده کرده است. در این ماهواره، حرارت تولیدی لیزر در EBOX با استفاده از رادیاتورهای تعبیه شده در سمت فوقانی هر محفظه به بیرون منتقل می‌شود. سازه ماژولار محموله لیدار کالیپسو از فیبر M55J با رسانش حرارتی حدودی ۳۰ وات بر m-K ساخته شده است. در سازه کالیپسو، شاسی اپتیکی، محفظه محموله و تلسکوپ از یکدیگر عایق‌بندی شده‌اند. تغییرات دما در سامانه‌های اپتیکی منجر به تغییر ساختار المانه‌های عبوردهنده نور و در نهایت تغییر مسیر نور از راستای اولیه می‌شود. به‌طور کلی، تغییر شکل و جابه‌جایی المان‌ها در سامانه اپتیکی لیدار، خمش سازه، اغتشاش در پایداری همراستایی و یا تغییر خواص اپتیکی باعث ایجاد انحراف در مسیر پرتو می‌شود [۱۹].

لیزر به‌عنوان یکی از حساس‌ترین ماژول‌ها به دما در یک محموله رادار، تأثیر زیادی بر پایداری حرارتی نهایی محموله دارد. در حالتی که لیزر روشن است، گرمایی معادل ده برابر حالت آماده به‌کار ماهواره تولید می‌کند. ماژول لیزر می‌بایست کاملاً نسبت به تلسکوپ و باس محموله عایق‌بندی شده و باس ماهواره و تلسکوپ می‌بایست از نظر حرارتی کوپل باشند و سمتی از تلسکوپ که به‌سوی خورشید است، با MLI پوشانیده می‌شود. تعادل حرارتی در تلسکوپ محموله لیدار معمولاً با

د) ملاحظات تشعشعی تابش‌های محیط فضا بر عملکرد و طول عمر قطعات اپتیکی و الکترونیکی محموله ماهواره‌ها تأثیرگذار است. بازده و عملکرد تجهیزات اپتیکی و قطعات الکترونیکی ماهواره‌ها پس از قرار گرفتن در معرض تشعشعات فضایی دچار تغییر می‌شوند. تشعشعات محیط فضا موجب بروز آسیب‌های تشعشعی شده و آسیب تشعشعی بر مائول لیزر به علت دوز یونیزان کل، بازده را در مأموریت‌های بیش از دو سال با افت مواجه خواهد کرد [۲۵]. انواع این آسیب‌ها بر اساس نوع مکانیزم عبارتند از:

- آسیب دوز یونیزان کل [۲۶]
- آسیب تک رخدادی
- آسیب جابجایی

در جدول ۵ می‌توان اثر تشعشعات را بر قطعات نوری مشاهده نمود. شبیه‌سازی‌های تشعشعی محیط بهره و پمپ یک محموله لیدار به‌منظور تخمین آسیب تشعشعی دوز یونیزان کل بر عملکرد زیرسیستم لیزر محموله لیدار یک ماهواره سنجشی در مدار نزدیک به زمین، نشان می‌دهد میزان دوز تشعشعی دریافت شده در قسمت محیط بهره در حالت بدون محافظ برابر با 1951 rad است. میزان دوز القایی با در نظر گرفتن شیلد آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر حدود 275 rad برای محیط بهره و حدود 623 rad برای پمپ لیزر، کاهش می‌یابد. همچنین، براساس محاسبات انجام شده و با در نظر گرفتن مدت زمان مأموریت و

تحلیل سیستمی در فاز بهره‌برداری

ملاحظات محموله لیدار از دیدگاه سیستمی در فاز بهره‌برداری شامل بررسی چالش استخراج داده‌ها، کیفیت سیگنال و شاخص سیگنال به نویز دریافتی است که در ادامه بررسی شده است.

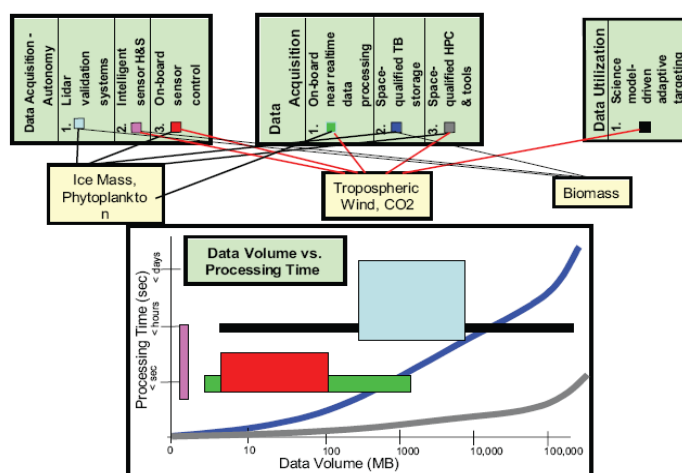
الف) ملاحظات استخراج داده

استخراج داده، ملاحظات خاصی دارد که در ادامه با توجه به دریافت تا کاربرد داده، حجم و زمان آن بررسی شده و ارتباطات و نسبت‌های آن به‌صورت خلاصه در شکل ۷ ارائه شده است. بر این مبنا و با توجه به فناوری‌های توانمندسازی که در حوزه استخراج داده مدنظر هستند، در نموداری میزان کاربرد هر فناوری با توجه به سناریوهای اندازه‌گیری مورد نیاز آن، به نمایش گذاشته شده است. با توجه به مواردی که بررسی شده و در نمودارها گزارش شده، می‌توان مجموعه‌ای از فناوری‌های مورد نیاز در استخراج داده محموله لیدار را تعیین نموده و ملاحظات مختلف آن را مبنای پارامترهای چالش مشاهده کرد [۲۱].

جدول ۵: اثرات تشعشعی بر منابع نوری نیمه هادی و آشکارسازها

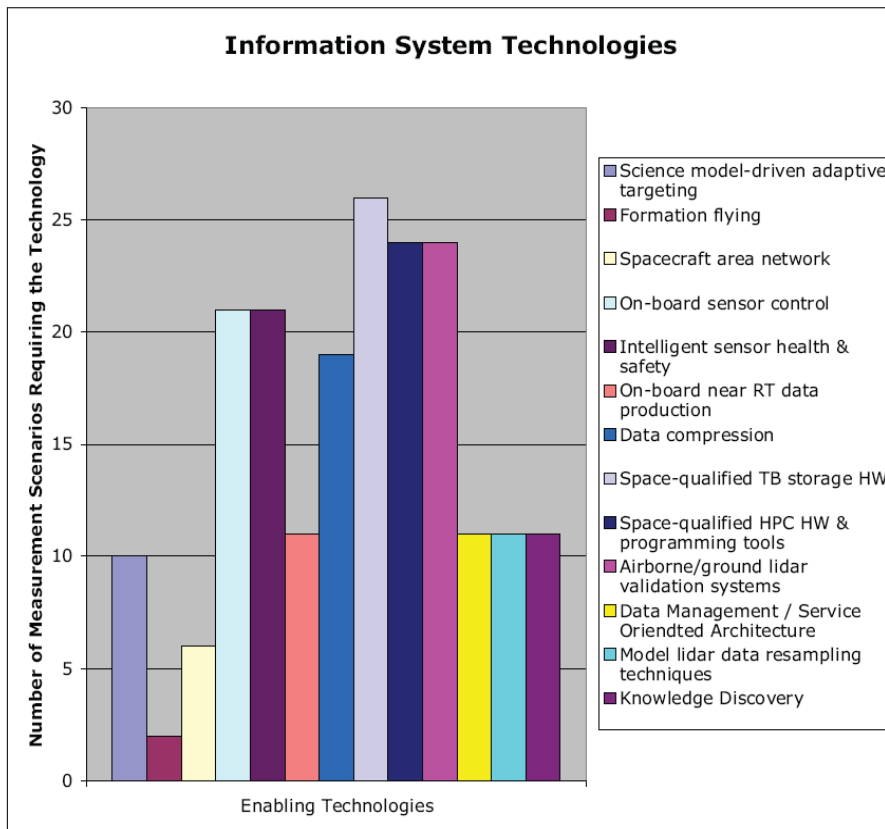
Table 5: Radiation effects on semiconductor light sources and detectors

شار پروتون Proton flux	شار نوترون Neutron flux	قطعه piece
کاهش توان خروجی Reduce the output power	کاهش توان خروجی Reduce the output power	LED
افزایش جریان آستانه Increase the threshold current	افزایش جریان آستانه و کاهش بازده کوانتومی Increasing the threshold current and reducing the quantum efficiency	دیود لیزری Laser diode
افزایش جریان نشتی Increased leakage current	افزایش جریان نشتی، کاهش پاسخ‌دهی مدار Increasing the leakage current, reducing the response of the circuit	دیود نوری (فوتودیود) Light diode (photodiode)



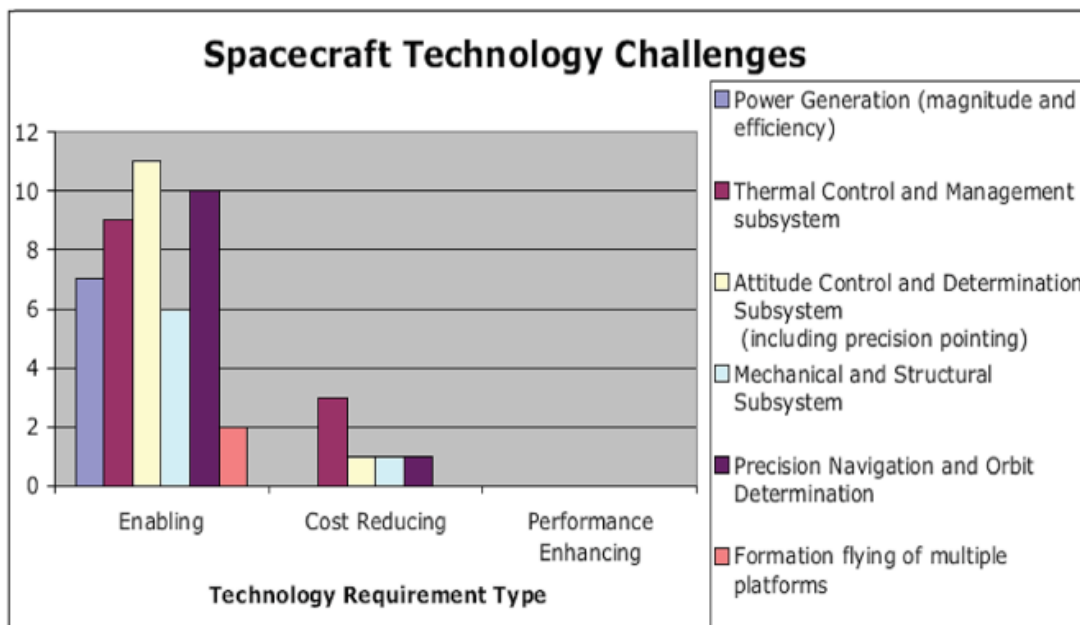
شکل ۷: مرور ملاحظات استخراج داده [۲۲]

Fig. 7: data mining considerations [22]



شکل ۸: کاربردهای فناوری‌های مرتبط با استخراج داده [۱۴]

Fig. 8: Applications of technologies related to data mining Analysis [14]



شکل ۹: ملاحظات فناوری‌های مرتبط با پارامترهای چالش و میزان اثرگذار آن‌ها [۱۴]

Fig. 9: Considerations of technologies related to challenge parameters and their effectiveness [14]

جدول ۶: کاربردها در کنار فناوری‌های مربوطه و الزامات آن‌ها از دیدگاه استخراج داده [۱۴]

Table6: Applications along with related technologies and their requirements from a data mining perspective [14]

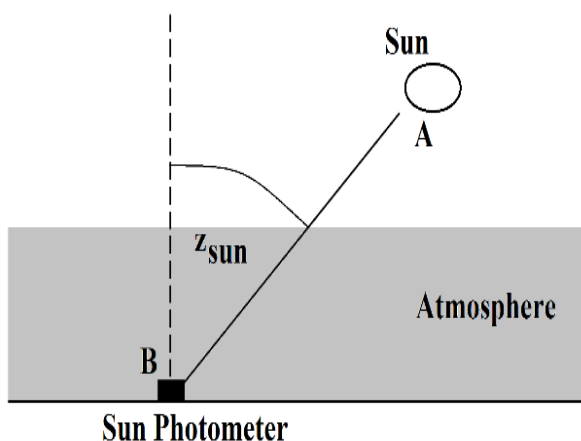
Measurement	Technology	State-of-the-Art	Requirements	Development Need
Wind (direct or hybrid), Aerosol	MCP PMT, CMOS Delta-doped Si III-N PIN arrays or APD	PMTs, QE ~25% Si APD, >65% QE, <300 cps DCR, <50 ns dead time ACCD: 85% QE, 16x16 pixels, 25 x 2.1 μs range gates, 7 noise e ⁻ per pixel, 16-bit ADC I ² PC: 40% PDE, 256x256 pixels, 10s of ps	Single element or array detectors with single photon counting sensitivity, PDE > 50%, internal gain 10 ⁶ , dark current <1 kcps, active area >2 mm ²	Develop and demonstrate photon counting detector arrays for increased dynamic range
Wind (coherent) CO ₂ , non-CO ₂ GHG, water	HgCdTe APD arrays	80-K, 2x8 pixel arrays, 75% QE, 200-kHz DCR, few photon sensitive, 10- MHz bandwidth, 400-4200 nm responsivity	Multipixel arrays, >75% QE, <200 kHz DCR, few photon sensitive, 10-MHz bandwidth, 750- 3400 nm responsivity, low power consumption (<5 W including cooler)	Develop and demonstrate arrays
Ocean Mixed Layer	Si APD or PMT	PMTs, QE ~25% Si APD, >65% QE, <300 cps DCR, <50 ns dead time	Gated on and off within 20-50 ns, high quantum efficiency (>50%, goal >70%), excess noise factor <2 (variance domain), low afterpulsing, large dynamic range, large aperture (>1 mm ²), low dark noise, gain 10 ³ - 10 ⁶	Develop and demonstrate arrays
Topography, 3D biomass, Aerosol	Si APD or PMT (532 nm) InGaAs or HgCdTe APD (1064 nm)	InGaAs: 256x64 pixel arrays, 35% QE, <10 kHz DCR, single photon sensitive, ~350 ps timing jitter, asynchronous HgCdTe: 80-K, 2x8 pixel arrays, 75% QE, 200 kHz DCR, few photon sensitive, 10-MHz bandwidth, 400- 4200 nm responsivity	Large arrays (256x256), high- efficiency (>50%), high- bandwidth (1 GHz), low-timing jitter (<100 ps) arrays with high count rates (>100 Mcps).	Low-cost, high efficiency, larger format, radiation hard photon counting arrays

(ب) ملاحظات سیگنال به نویز در هنگام اخذ داده در یک سامانه لیدار، پارامتر سیگنال به نویز از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. توان اپتیکی رسیده به ورودی تلسکوپ با عبور از اپتیک گیرنده به آشکارسازها رسیده و بعد از تقویت به ولتاژ تبدیل می‌شود. ولتاژ ناشی از پس‌پراکنندگی اتمسفر V_s ، با ولتاژ نویز V_n (نویز پس زمینه V_b ، نویز جریان تاریک و نویز گرمایی V_t) آمیخته شده و ثبت می‌شود:

$$V = V_s + V_n = V_s + (V_b + V_d + V_t) \quad (1)$$

این بررسی‌ها به مجموعه‌ای از فناوری‌ها منتج خواهد شد که کاربرد معادل آن‌ها به صورت مشخصات اندازه‌گیری مطرح شده و فناوری مرتبط آن‌ها به همراه الزامات مربوطه در جدول ۶ دسته‌بندی و مستند شده است. مجموع این ملاحظات به صورتی که بتواند به عنوان ورودی برای طراحی محموله‌های لیدار استفاده شده و بر مبنای الزامات فناوری قابل استفاده باشد، در طراحی سیستمی به شدت مورد توجه است.

می‌شود. ضریب خاموشی نیز به نوبه خود از مجموع دو اثر پراکنش و جذب تابشی ذرات در جو به‌دست می‌آید. هواویزهای جوی با دو فرآیند جذب و پراکنش، باعث کاهش شدت نور مستقیم خورشید می‌شوند. پراکنش پرتو نور توسط ذرات و قطرات معلق در جو (با فرض کروی بودن) به‌وسیله نظریه می (Mie) توصیف می‌شود. البته نکته مهم در این‌جا محلی بودن این تغییرات یا به‌عبارتی وابستگی این تغییرات به ترکیبات فیزیکی و شیمیایی جو منطقه اندازه‌گیری است. عمق نوری هواویزها در یک چرخه شبانه‌روزی دچار تغییر می‌شود. همرفت در لایه مرزی نقش مهمی در اختلاط شبانه‌روزی هواویزها و عمق نوری آن‌ها دارد. در ساعات اولیه روز، به‌دلیل وجود مه و غبار صبحگاهی، معمولاً تیرگی جو افزایش دارد که این، امری کاملاً طبیعی محسوب می‌شود. همچنین، در ساعات پایانی بعد از ظهر، به‌دلیل طولانی‌تر شدن مسیر عبور پرتو نور از لایه مرزی، هواویزهای بیشتری در مسیر پرتو قرار می‌گیرند که این مسئله نیز از دلایل احتمالی تیرگی در این زمان به‌شمار می‌رود (شاپ، ۲۰۰۳). علاوه بر ملاحظات و موارد مذکور برخی دیگر از الزامات مرتبط با نوپز در سایر بخش‌های لیدار می‌بایست بررسی شود.



شکل ۱۰: تغییرات زاویه تابش خورشید مرتبط با تغییرات شبانه‌روزی عمق نوری ابروسل‌ها

Fig. 10: Variations of solar radiation angle associated with Day and night changes of optical depth of aerosols

تغییرات عمق نوری ابروسل‌ها در زاویه‌های زینت مختلف (۶ صبح، ۱۲ ظهر و ۶ غروب) محاسبه شده توسط دستگاه سان فتومتر در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. یکی از دلایل استفاده از سه طول موج ۴۴۰، ۶۷۵ و ۸۷۰ نانومتر در اندازه‌گیری و محاسبه AOD افزایش قابلیت اطمینان در اندازه‌گیری دستگاه سان فتومتر بوده است. مطابق با شکل ۱۱ در یک بازه یک‌ساله، AOD در طول روز حدود ۱۵ درصد نسبت به میانگین سالانه تغییرات دارد، به‌عبارت دیگر، زاویه زینت در طول یک روز حدود ۱۵٪ در تغییر عمق نوری ابروسل‌ها و به تبع آن نوپز پس زمینه مؤثر است. به‌عبارت دیگر، پیش‌بینی می‌شود نقش زاویه زینت خورشید در فاز بهره‌برداری از محموله لیدار در آسمان ایران (منطقه زنجان، با شرایط اتمسفری منحصر به‌فرد) حدود ۱۵ درصد باشد.

نویزهای جریان تاریک و نوپز گرمایی برای یک سامانه مشخص، ثابتند اما نوپز پس زمینه با تغییر شدت پس زمینه و همچنین شرایط فیزیکی و شیمیایی اتمسفر تغییر می‌کند. از این‌رو، ولتاژ نوپز به دو قسمت نوپز ثابت (ولتاژ جریان تاریک و نوپز گرمایی) و متغیر (نوپز پس زمینه) تقسیم می‌شود.

$$V_n = V_b + DC \quad (2)$$

بر اساس روابط (۲ و ۱)، نوپز پس زمینه بیشترین تغییرات زمانی و مکانی را در فاز بهره‌برداری و اندازه‌گیری لیدار دارد. پارامتر بهبود نرخ سیگنال به نوپز با در نظر گرفتن P_b به‌عنوان توان نوپز پس زمینه آسمان با رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$G_{imp} = \frac{SNR_{Max}}{SNR_{Unpol}} = \sqrt{\frac{P_b^{min} + P_b^{max}}{P_b^{min}}} = \sqrt{1 + \frac{P_b^{max}}{P_b^{min}}} \quad (3)$$

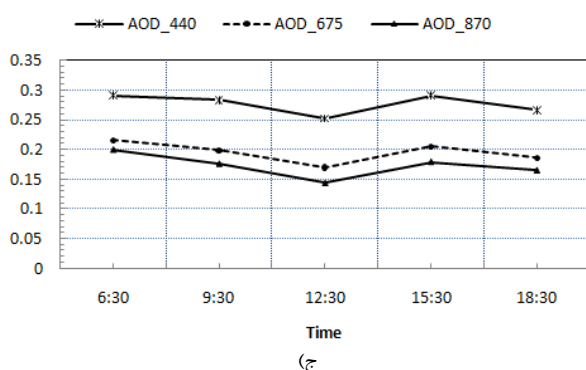
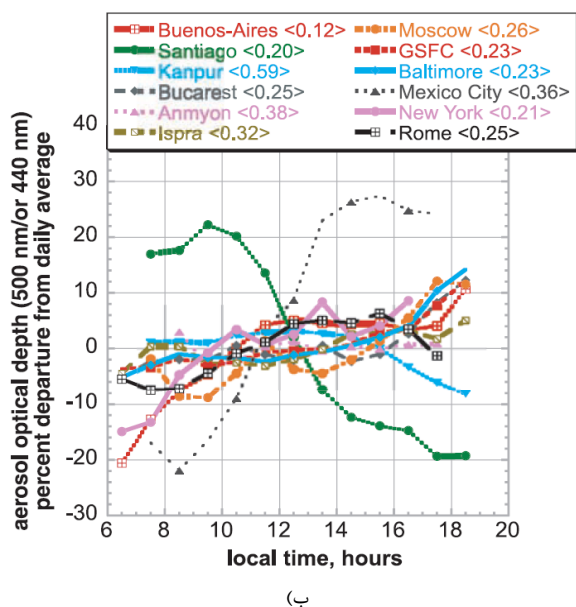
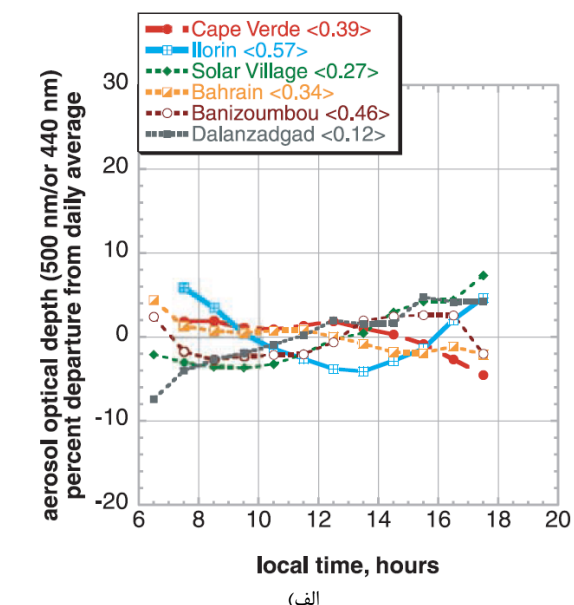
یکی از مهم‌ترین پارامترهای مرتبط با نوپز پس زمینه اتمسفر، زاویه تابش خورشید یعنی زاویه زینت است. در فاز طراحی محموله لیدار، به‌دلیل این‌که ماهواره در مدار قرار ندارد و هنوز داده‌ای اخذ و اندازه‌گیری حاصل نشده است، برای بررسی دقیق‌تر نقش زاویه زینت بر نرخ سیگنال به نوپز در هنگام بهره‌برداری از عمق نوری ابروسل‌ها (AOD) استفاده می‌شود. از این‌رو، ابتدا می‌بایست عمق نوری ابروسل‌ها (AOD یا τ) با استفاده از اندازه‌گیری دقیق زمینی (دستگاه سان فتومتر) محاسبه و اندازه‌گیری شود. شدت نور خورشید هنگامی که از جو عبور می‌کند، توسط هواویزهای موجود در جو با فرآیندهای جذب و پراکنش تضعیف می‌شود (شکل ۱۰). با استفاده از قانون بیر-لامبرت، رابطه بین شدت نور عبوری از جو (شدت نوری که به دستگاه نورسنج می‌رسد)، شدت نور قبل از ورود به جو و عمق نوری جو از رابطه ۴ به‌دست می‌آید:

$$I = I_0 \exp(-m\tau(\lambda)) \quad (4)$$

که I شدت تابش نور رسیده به سطح زمین (دستگاه نورسنج خورشیدی) در طول موج مشخص λ و زاویه سرسوی Z بوده و I_0 شدت نور تابیده شده به تارک جو است. m بیانگر جرم هوای در مسیر عبور پرتو و τ عمق نوری جو است [۲۸].

مسیر AB در شکل ۱۰ در طول یک شبانه‌روز کاملاً با زاویه زینت خورشید (Z) تغییر می‌کند و در واقع با بررسی اثر تغییرات AOD می‌توان نقش زاویه زینت را در هنگام بهره‌برداری مشخص نمود. شایان ذکر است در این مطالعه داده‌های AOD مرکز داده‌های سان فتومتر ناسا (ایرونِت) از سراسر دنیا استفاده شده است. از آن‌جا که در ایران فقط در شهر زنجان این مرکز تأمین داده وجود دارد، انتخاب به همین شهر محدود می‌شود. به‌عبارت دیگر، ملاک انتخاب شهرهای دنیا، وجود مراکز داده AERONET بوده است.

تغییرات ساعتی عمق نوری ابروسل‌ها در طول روز در لایه مرزی اتمسفر با تغییرات زاویه تابشی خورشید (زاویه زینت) مرتبط است. عمق نوری هواویزها با انتگرال‌گیری از ضریب خاموشی در یک ستون جو محاسبه



شکل ۱۱: تغییرات شبانه‌روزی AOD نسبت به میانگین در طول موج‌های متفاوت (الف) در زنجان، (ب) شهرهای پرجمعیت و صنعتی دنیا و (ج) مناطق متأثر از گرد و غبار [۲۸]

Fig. 11: Changes of AOD relative to the mean during different wavelengths (a) in Zanjan, (b) populated and industrialized cities of the world and (c) dust-affected areas [28]

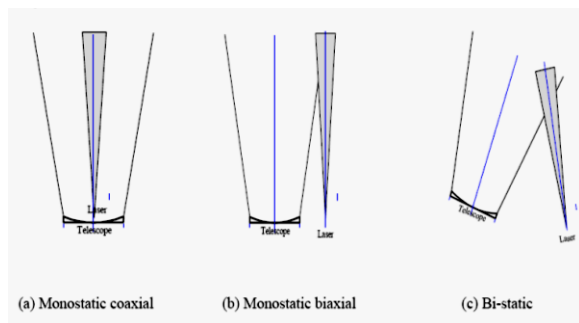
همچنین، در زوایای زنیت زیر ۵۰ درجه در ساعات حدود ۱۰ صبح و ۲ بعد از ظهر زمان مناسبی برای داده‌برداری تخمین شده است که این امر کاملاً با زاویه تابش خورشید و میزان پراکنش نور در اتمسفر مرتبط است. بر اساس مطالعات جهانی انجام شده توسط اسمیرنوف و همکاران [۲۸]، بازه تغییرات شبانه‌روزی عمق نوری ایروسل‌ها بین ۱۰ تا ۴۰ درصد نسبت به مقدار میانگین شبانه‌روزی است. این تغییرات در مناطق شهری آلوده و صنعتی بیشترین و در مناطق روستایی کمترین مقدار را دارد. با استفاده از نتایج لیو و همکاران، در چین و به‌علت تشابهات منطقه‌ای می‌توان گفت در زنجان، علت این تغییرات شبانه‌روزی در عمق نوری هواویزها احتمالاً ناشی از تغییر خواص شیمیایی هواویزها (ترکیب هواویزهای گردوغبار و هواویزهای شهری صنعتی) و شرایط هواشناسی منطقه می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود که الگوی تغییرات شبانه‌روزی عمق نوری هواویزها در شهرهای صنعتی و پرجمعیت دنیا نظیر مکزیکوسیتی دارای تغییرات حدود پنجاه درصد و سانتیاگو حدود ۴۰ درصد است. شکل ۱۱-ج مربوط به برخی دیگر از مناطق جهان نظیر کیپ ورده واقع در غرب آفریقا، ایلورین، نیجریه و بحرین که نمونه‌هایی از مناطقی هستند که متأثر از رویدادهای گردوغبار می‌باشند، تغییرات شبانه‌روزی کمتر از ده درصد است. تغییرات در شهر زنجان تقریباً مشابه تغییرات در برخی از مناطق دنیا نظیر کانپور (با تغییرات شبانه‌روزی حدوداً ده درصدی) در شمال هند و شهر رم در ایتالیا (با تغییرات شبانه‌روزی ده تا پانزده درصد) که متأثر از آلاینده‌های شهری-صنعتی و گردوغبار هستند، می‌باشد.

همچنین، از دیگر الزامات برای بهبود نرخ سیگنال به نویز در فاز بهره‌برداری که با زاویه‌های تابشی خورشید در طول روز مرتبط است نوع تکنیک گسسته‌سازی قطبش سیگنال است [۲۹].

بهبود نرخ سیگنال به نویز از روی اندازه‌گیری لیدار با استفاده از روش انتخاب- رهگیری قطبیده برای کاهش مؤلفه‌های نویز پس زمینه نرخ سیگنال به نویز را در مقایسه با آشکارسازی و قطبیده به‌طور واضح افزایش می‌دهد. نتایج، نشان می‌دهد این تکنیک برای ساعات روز و در شرایط حضور نویز پس زمینه آسمان در طول موج ۵۳۲ نانومتر نرخ سیگنال به نویز به‌میزان حدود ۳/۳ و در بهره‌مندی از رنج لیدار حدود ۳۴ درصد نسبت به حالت موج واقطبیده افزایش خواهد داشت. این بهبود، برای سایر لیدارهایی که هم به‌صورت نقطه‌ای و هم قائم اسکن می‌کنند در هنگام طلوع و غروب خورشید که زوایای پراکنش بیشترین است رخ می‌دهد. همچنین، با زاویه زنیت زیر ۵۰ درجه حدود ساعات ۱۰ صبح و ۲ بعد از ظهر این امر کاملاً با زاویه تابش خورشید و میزان پراکنش نور در جو مرتبط است. هرچند بررسی تأثیر میزان ابرناکی بر نرخ سیگنال به نویز کمی پیچیده و تا حدودی مبهم است. تغییرات شبانه‌روزی نرخ سیگنال به نویز می‌تواند به‌علت تغییرات رطوبت نسبی، عمق نوری ایروسل‌ها و تغییرات زاویه تابش خورشید رخ دهد.

تفکیک قائم، هدایت پرتو و ملاحظات واگرایی، کارایی و اثربخشی بهتری دارد.

برای محموله‌های لیدار با هر مأموریتی، انطباق‌پذیری با تعداد فوتون‌های ورودی (به‌منظور دسترسی به بالاترین قدرت تفکیک مکانی چه افقی و چه عمودی در فاصله اندازه‌گیری) به‌عنوان یک ملاحظه باید رعایت شود. در یک سامانه لیدار اپتیکی صفحه و فاصله کانونی متأثر از بازده کوانتومی (میزان بازدهی انتقال‌دهی فوتون‌ها به الکترون‌ها) است که وابسته به میزان سیگنال به نویز است و در نهایت، نقش چیدمان هندسی بر نرخ سیگنال به نویز را نشان می‌دهد. از این‌رو، در محموله‌های لیدار فارغ از مأموریت آن، انطباق‌پذیری با تعداد فوتون‌های ورودی به‌منظور دسترسی به بالاترین قدرت تفکیک مکانی چه به صورت افقی و چه عمودی، به‌عنوان یک ملاحظه می‌بایست رعایت شود.

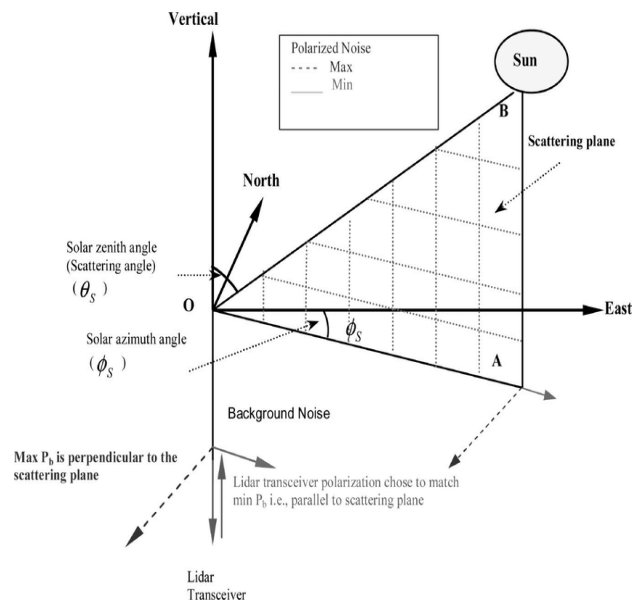


شکل ۱۳: الف) چیدمان طراحی لیدار و میدان دید متناسب با آن، ب) میزان همپوشانی میدان دید لیزر و تلسکوپ در ساختار منواستاتیک [۳۱]
 Fig. 13: a) Lidar design arrangement and field of view corresponding to it, b) overlap of laser and telescope field of view in the monostatic structure [31]

تأثیر چیدمان هندسی بر نرخ سیگنال به نویز در لیدارهای رامن و دیال (لیدارهای جذبی) به مراتب پیچیده‌تر از لیدارهای پس پراکنشی است. چالش اصلی در فاز بهره‌برداری و طی روز جهت بهبود نرخ سیگنال به نویز، نویز پس زمینه آسمان (BGP) است. این حساسیت در لیدارهایی که از فناوری رامن استفاده می‌کنند، بیشتر مشهود است [۳۱]. حذف نویزهای پس زمینه در طول روز و هنگامی که همپوشانی کامل بین میدان دید لیزر و تلسکوپ ایجاد می‌شود، مسأله بسیار با اهمیتی است و لازم است این قید در طراحی‌ها حتماً لحاظ گردد.

ج) آشکارساز و محدودیت‌های زیرسیستم آشکارساز
 آشکارساز یک المان الکترواپتیکی است که انرژی نور را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و ابتدا شدت نور را به‌صورت کمی اندازه‌گیری و سپس موج (نور) الکترومغناطیس را در ناحیه خارج از طیف مرئی ثبت می‌نماید. در سیستم‌های لیدار معمولاً از فتو مالتی تیوب (PMT) به‌عنوان آشکارساز، برای ثبت سیگنال پس پراکنشی در طیف مرئی و فرابنفش و سیگنال لیدار رامن استفاده می‌شود. فتودیودهای بهمنی (APD) نیز برای ثبت سیگنال‌های برگشتی (پس پراکنشی) در محدوده مادون قرمز کاربرد دارند.

نکته مهمی که در این حوزه می‌بایست مورد توجه قرار گیرد، بهبود نرخ سیگنال به نویز در خروجی PMT است. با در نظر گرفتن شرایط فاصله کانونی کم fs و زیاد fL برای تلسکوپ، در رژیم نویزشات، ضریب بهبود نرخ سیگنال به نویز SNRimp به‌عنوان تابعی از نویز پس زمینه آسمان (BGP) در فواصل کم و زیاد کانونی تلسکوپ بیان می‌شود. علاوه بر موارد فوق و مطابق با نظریه پراکنش یگانه، کمترین شدت نویز پس زمینه آسمان زمانی است که جهت قطبش موج با زاویه آزیموت خورشید معادل باشد و از این‌رو، اثر زاویه آزیموت بر بهبود نرخ سیگنال به نویز قابل بررسی می‌باشد. (شکل ۱۲)



شکل ۱۲: نقش زاویه زینت و آزیموت در ملاحظات نویز پس زمینه آسمان [۳۰]
 Fig. 12: Zenith and azimuth angle role in sky background noise considerations [30]

د) تأثیر چیدمان هندسی و مشخصات تلسکوپ بر نرخ SNR
 چیدمان هندسی سامانه‌های لیدار مطابق شکل ۱۳ شامل سه نوع ساختار فیزیکی است.

ساختار منواستاتیک به‌عنوان یک سامانه پیشرفته اغلب در همه سکوها خصوصاً سکوهایی فضایی، استفاده می‌شود. چیدمان سامانه‌های لیدار دارای لیزر پالسی منواستاتیک می‌باشد که لیزر و تلسکوپ در کنار هم قرار دارند. این ساختار، نسبت به ساختار بای‌استاتیک از نظر قدرت

همچنین، زاویه زنیت زیر ۵۰ درجه در ساعات ۱۰ صبح و ۲ بعد از ظهر مشاهده می‌شود که این امر کاملاً با زاویه تابش خورشید و میزان پراکنش نور در جو مرتبط بوده و زمان مناسبی برای داده‌برداری در منطقه ایران خصوصاً زنجان می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج حاصله، هنگام طلوع و غروب خورشید که بیشترین پراکنش وجود دارد، نرخ سیگنال به نویز را تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین مبتنی بر اندازه‌گیری‌های میدانی عمق نوری ایروسل‌ها پیش‌بینی می‌شود در اتمسفر ایران به‌جز در مناطق صنعتی و آلوده، زاویه زنیت تا حدود میانگین ۱۵ درصد بر نرخ سیگنال به نویز در زمان داده‌برداری محموله لیدار مؤثر باشد که البته این مقدار برای مناطق آلوده نظیر تهران تا حدود ۴۰ درصد و بیشتر پیش‌بینی می‌شود. به‌عنوان مثال همپوشانی ایجاد شده بین پرتو لیزر و میدان دید تلسکوپ، در لیدارهایی با ساختار هندسی بای‌اکسیال، مهم‌ترین جنبه از ملاحظات نویز در یک سامانه لیدار می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [1] Imai T, Kawamura Y, Tanioka N, Asai K, Itabe T, Uchino O, Kobayashi T, Sasano Y, Aoyagi T. NASDA ELISE (MDS-lidar) program. Proc. of SPIE. 1997; 3218: 177-183. <https://doi.org/10.1117/12.295656>
- [2] Mori T and Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*. 1973; 21(5): 571-574. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)
- [3] An H, Zhang K. Functional Safety Design of Lidar System for Autonomous Vehicles. *2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, Dalian, China, 2022. <https://doi.org/10.1109/AEECA55500.2022.9919087>
- [4] Jayakumar P. *Modeling and identification in structural dynamics*. [dissertation]. California Institute of Technology, Pasadena, California, 1987.
- [5] Morciano A, Perenzoni M, D'Amico S. Signal-to-Noise Ratio in Pulsed Mode SiPMs for LiDAR Applications. *2021 International Conference on IC Design and Technology (ICIDT)*, Dresden, Germany: 2021. <https://doi.org/10.1109/ICIDT51558.2021.9626464>.
- [6] Schaap M, Apituley A, Timmermans R.M.A., Koelemeijer R.B.A., de Leeuw G. Exploring the relation between aerosol optical depth and PM2.5 at Cabauw, the Netherlands. *Atmos. Chem. Phys.* 2009; 9: 909-925.

شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که خصوصاً در اندازه‌گیری‌های قائم، کمینه‌کردن نویز پس زمینه آسمان در بهبود نرخ سیگنال به نویز تأثیر زیادی دارد. البته در این حالت طراحی مناسب دهانه تلسکوپ نیز حائز اهمیت است.

بزرگترین نقص یک محموله لیدار با الگوریتم چیدمان کواکسیال که پرتو لیزر بر محور میدان دید تلسکوپ منطبق است، این است که مسأله اشباع آشکارساز از سیگنال‌های پراکنش غیرمفید و مزاحم در اپتیک گسیلنده لیدار رخ داده و در کاهش نرخ سیگنال به نویز مؤثر بوده و به‌عنوان یک عامل منفی همیشه مطرح می‌شود. اگرچه الگوریتم چیدمان لیدارهای بای‌اکسیال که در آن‌ها گسیلنده لیزر و تلسکوپ در کنار هم قرار دارند، می‌تواند به عنوان یک رهیافت عملیاتی در حل این مشکل مطرح شود، اما از سوی دیگر، پارامتر شکل هندسی لیدار (GF)، تأثیر منفی بر کمیت و کیفیت داده‌های ثبت شده در رنج کوتاه را دارد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق، علاوه بر آن‌که ملاحظات موجود در طراحی فرستنده و گیرنده محموله لیدار و استخراج داده از این محموله را بیان نموده و نگاشت آن‌ها را با توجه به کاربردهای مختلف به فناوری‌های مرتبط ارائه می‌کند، اثرات محیطی مهم را که در این‌جا تشعشع و محیط حرارتی است، مورد بررسی قرار داده است. نتایج این تحقیق، نه تنها می‌تواند برای بهره‌برداری در مطالعات موردی کارگشا باشد، بلکه امکان تکمیل دستاوردهای این تحقیق با بررسی و افزودن ملاحظات دیگر و همچنین توسعه آن‌ها در سطح زیرسیستم‌ها یا المان‌های دیگر محموله نیز وجود دارد.

مأموریت‌های اندازه‌گیری ایروسل‌ها، طراحی مشخصات فنی فرستنده لیزر و سناریو مأموریت اندازه‌گیری دی‌اکسیدکربن و ازون در الزامات فنی تلسکوپ (سامانه اپتیکی) محدودکننده خواهد بود.

همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد در خصوص پارامترهای محیطی تشعشعی، محاسبه آسیب دوز یونیزان کل به‌عنوان یک گلوگاه طراحی، افت بازده عملکرد ماژول لیزر را موجب شده و در زیرسیستم کنترل حرارت با استفاده از شاخص بحرانی توان به وزن، کنترل حرارت فعال و غیرفعال را تعیین می‌نماید.

در ادامه این پژوهش، ملاحظات سیستمی و عوامل مؤثر بر نرخ سیگنال به نویز در فاز طراحی و بهره‌برداری محموله لیدار ماهواره‌های سنجشی بررسی گشته و با تأکید بر فاز بهره‌برداری و داده‌برداری به تأثیر تغییرات زاویه زنیت و نویز پس زمینه آسمان اشاره شد. چالش‌های فنی تأثیر ساختار هندسی و نحوه جانمایی لیدار، اپتیک و الکترونیک در بهینه‌کردن نرخ سیگنال به نویز از موارد دیگری است که در مقاله به آن پرداخته شده است.

نتایج، نشان می‌دهد تغییرات عمق نوری ایروسل‌ها در ساعات مختلف روز و به تبع آن تغییرات زاویه زنیت بین ۱۰ تا ۴۰ درصد مبتنی بر شرایط اتمسفر می‌تواند بر نرخ سیگنال به نویز لیدار مؤثر باشد.

- [18] do Carmo J. P. and et al. Atmospheric LIDar (ATLID): pre-launch testing and calibration of the European space agency instrument that will measure aerosols and thin clouds in the atmosphere. *Atmosphere*. 2021; 12(1):76. <https://doi.org/10.3390/atmos12010076>
- [19] Abshire J.B. NASA's space lidar measurements of the earth and planets. IEEE Photonics Society Meeting, University of Maryland, 2011. <https://doi.org/10.1364/FIO.2010.SMB1>
- [20] Ma G, Vukobratovich D, Valente T.M, Valente M.J. Design and construction of an optical system for infrared target simulator. *Proceedings of the SPIE*. 1995; 2469: 53-56. <https://doi.org/10.1117/12.210634>
- [21] Ott M.N., Coyle D.B., Canham J., Leidecker H. Qualification and issues with Space Flight Laser Systems and Components. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 6100. 2006; <https://doi.org/10.1117/12.674042>
- [22] M. Khoshshima, M. Shahriary, S. Ghazanfarinia, S. Emami, Y. Saffar, "Thermal Modeling of Lidar Payload in a Remote Sensing Satellite under System Level Considerations with a Review on its Challenges," *Space Science and Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 79-91, 2003. [In Persian]
- [23] ECSS Secretariat. Thermal analysis handbook. Noordwijk, The Netherlands, ESA Requirements and Standards Division, 2016.
- [24] Hönninger C. et al. Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers. *Applied Physics B*. 1999; 69:3-17. <https://doi.org/10.1007/s003400050762>
- [25] Johnson A.H, Miyahira T.F. Radiation Degradation Mechanisms in laser diodes. *IEEE Transactions on Nuclear science*. 2004; 51(6): 3564-3571. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.839166>
- [26] Khoshshima M, Amjadifard R, Zamani Moghadam S, Ghazanfarinia S. Effect of total ionizing dose damage on laser subsystem of space lidar payloads. *Journal of the Earth and Space Physics*. 2018; 44(1): 163-167-91. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2017.60296>
- [27] Khoshshima M, Amjadifard R, Zamani Moghadam S. Investigating the space environmental requirements in reducing the functional risk of the laser payload of the remote sensing satellite lidar: the effect of the total ionizing dose in the design. *16th international conference of Iranian Aerospace Society papers*, 2017. [In Persian]
- [28] Smirnov A, Holben B. N, Eck T. F, Slutsker I, Chatenet B, Pinker R. T. Diurnal variability of aerosol optical depth observed at aeronet (aerosol robotic network) sites. *geophysical research letters*. 2002; 29(23): 30-1 - 30-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL016305>
- [29] Hassebo Y, Gross B, Moshary F, Ahmed S. Lidar signal-to-noise ratio improvements by receiver aperture design analysis and optimization techniques. *Junior Scientist Conference*: 2006: Vienna, Austria. <https://doi.org/10.5194/acp-9-909-2009>
- [7] Nakajima T, Hayasaka T, Higurashi A, Hashida G, Moharram-Nejad N, Najafi Y, Valavi H. Aerosol Optical Properties in the Iranian Region Obtained by Ground-Based Solar Radiation Measurements in the summer of 1991. *Journal of Applied Meteorology*. 1996; 35: 1265-1278. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<1265:AOPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<1265:AOPIT>2.0.CO;2)
- [8] Chih-Chung W, Hui-Hsuan Y. Comparative influences of airborne pollutants and meteorological parameters on atmospheric visibility and turbidity. *Atmospheric Research*. 2010; 96: 496-509. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.12.005>
- [9] Guo J, Xiao-Ye Zh, Hui-Zheng C, Sun- Ling G, Xingqin A, Chun-Xiang C, Jie G, Hao Zh, Ya-Qiang W, Xiao-Chun Zh, Min X, Xiao-Wen L. Correlation Between PM Concentrations and Aerosol Optical Depth in Eastern China. *Atmospheric Environment*. 2009; 43(37): 5876-5886. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.026>
- [10] Crockett S.K. Mechanical Design of a LIDAR system for Space Applications LITE. *Proc. SPIE 1222, Laser Radar V*, <https://doi.org/10.1117/12.18382>
- [11] Ehret G, Bousquet P, Pierangelo C, Alpers M, Millet B, Abshire JB, Bovensmann H, Burrows JP, Chevallier F, Ciais P, et al. MERLIN: A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane. *Remote Sensing*. 2017; 9(10):1052. <https://doi.org/10.3390/rs9101052>
- [12] Cheng L, Xie C, Zhao M, Li L, Yang H, Fang Z, Chen J, Liu D, Wang Y. Design of Lidar Data Acquisition and Control System in High Repetition Rate and Photon-Counting Mode: Providing Testing for Space-Borne Lidar Sensors. 2022; 22(10):3706. <https://doi.org/10.3390/s22103706>
- [13] Cosentino A, Mondello A, Sapia A, D'Ottavi A, et. al. All-Solid-State Laser Transmitter for Space Based LIDAR Applications, 22nd Int. Laser Radar Conf.: 2004: Matera, Italy.
- [14] Evans D, Glackin D, Kunkee D, Valinia A. Working Group Report: Active and Passive Microwave Technologies. NASA Earth Science Technology Office report, ESTO 2004.
- [15] Hughen L. IEEE Citation Reference," IEEE, [Online]. Available: <https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf>. [Accessed: 10-Sep-2016].
- [16] Guentchev G. N, Bayer M. M, Li X, Boyraz O. Mechanical design and thermal analysis of a 12U CubeSat MTCW lidar based optical measurement system for littoral ocean dynamics. *CubeSats and SmallSats for Remote Sensing*. 2021; 11832: 71-98. <https://doi.org/10.1117/12.2597709>
- [17] Veisi Khanghahi I, Fakoor M, Shahryari M. Optimal Layout Design of a Satellite Considering Thermal Control Subsystem Constraints. *Modares Mechanical Engineering*. 2019; 19(8):1959-1969. [in Persian] <https://doi.org/20.1001.1.10275940.1398.19.8.16.4>

✉ m.khoshsima@isrc.ac.ir



سجاد غضنفری‌نیا دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا می‌باشند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: مهندسی سیستم‌های فضایی.

Ghazanfarinia, S. Researcher at Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

✉ s.ghazanfarinia@isrc.ac.ir



راضیه نریمانی دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات میدان از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بوده و هم‌اکنون عضو هیأت علمی پژوهشگاه فضایی ایران می‌باشند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: مخابرات ماهواره‌ای، سیستم‌های فضایی، فرستنده و گیرنده‌های مخابراتی.

Narimani, R. Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

✉ r.narimani@isrc.ac.ir

[30] Hassebo Y, Gross B, Min O, Moshary F, Samir A. Polarization-discrimination technique to maximize the lidar signal-to-noise ratio for daylight operations. *Applied optics*. 2006; 45(22): 5521-31. <https://doi.org/10.1364/AO.45.005521>

[31] Hassebo Y. Lidar Signal-to-Noise Ratio Improvements: Considerations and Techniques. Doctor Of Philosophy, The City University Of New York, 2007.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مسعود خوش‌سیما استادیار پژوهشگاه فضایی ایران می‌باشند. ایشان دارای مدرک دکتری در رشته فیزیک می‌باشند. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه علوم و فناوری فضایی و سنجش از دور می‌باشد. در حال حاضر، ایشان بیش از ۳۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و همچنین، در کمیته علمی و داوری بیش از ۲۰ مجله و کنفرانس علمی ملی و بین‌المللی فعالیت داشته‌اند.

Khoshsima, M. Assistant Professor at Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

Citation (Vancouver): Khoshsima M, Ghazanfarinia S, Narimani R. [Systematic Analysis of Space Lidar Payload of Remote Sensing Satellites with Emphasis on the Effect of Environmental Parameters]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 187-204

<https://doi.org/10.22061/jrsg.2024.11050.1072>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)