



Design and construction of integrating sphere for calibrating space imagers

A. Bashiri, F. Jadidi, A. Mohammadi, S. M. Seyed Afghahi

*Researcher, Malekashtar University of Technology, Tehran, Iran.

(Received: 2024/05/08 revised: 2024/08/28 Accepted:2024/10/22 published: 2024/11/06)

Abstract

The accuracy of radiometric data analysis of space observing systems is necessary for researchers due to reception weak optical signals from scattered targets in space and to overcome detector noise. This is strongly related to accurate calibration of imagers. Using an integrating sphere for calibration of all types of spatial imagers is an accurate and efficient solution. The purpose of this paper is to design and manufacture an integrating sphere with high performance characteristics. Based on this, designing an integrating sphere has been done using relevant relations. In the following, simulations have been done using Zemax optic studio software and its results have been analyzed. Then a uniform optical integrating sphere system was constructed and evaluated. Finally, it has been used to calibrate an imager and get its signal to noise ratio. The signal to noise ratio reflects its radiance response and is the parameter that directly associates with the quality of its acquired images. The obtained results showed the success of using this integrating sphere in such imagers.

Keywords: integrating sphere, uniform optical source, calibration, lambertian reflector

Cite this article: A. Bashiri , F. Jadidi , A. Mohammadi , S. M. Seyed Afghahi, “ Design and construction of integrating sphere for calibrating” AppliedElectromagnetics ,vol.12,no.2,pp.99-109. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.11.1>



© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

*Corresponding Author Email: fjadidi@chmail.ir

طراحی و ساخت کره ادغام جهت کالیبره کردن تصویر بردارهای فضایی

عباس بشیری^۱، فائزه جدیدی^۲، علی محمدی^{۳*}، سیدمحمد سیدافقهی^۴۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، تهران، ایران ۲- پژوهشگر، دانشگاه مالک اشتر، تهران، ایران۳- کارشناسی ارشد، ۴- کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶)

چکیده

دقت تجزیه و تحلیل اطلاعات رادیومتری سامانه‌های رصد کیهانی به دلیل دریافت سیگنال‌های ضعیف نوری از اهداف پراکنده شده در فضا و لزوم غلبه بر نویزهای آشکارساز برای محققان بسیار ضروری است. این امر به شدت با کالیبراسیون دقیق تصویر بردار مرتبط است. استفاده از کره ادغام برای کالیبراسیون انواع تصویر بردارهای فضایی راه‌حلی دقیق و کارآمد است. هدف این مقاله طراحی و ساخت کره ادغام با ویژگی‌های عملکردی بالا است. بر همین اساس طراحی کره ادغام با استفاده از روابط مربوطه انجام شده است. در ادامه شبیه‌سازی کره با استفاده از نرم‌افزار تخصصی اپتیک استودیو زیمکس انجام و نتایج آن تحلیل شده است. سپس یک سیستم نوری یکنواخت کره ادغام با یکنواختی بالا و هزینه پایین، ساخته و ارزیابی شده است. در نهایت، از آن برای کالیبره کردن و به دست آوردن سیگنال به نویز یک نوع تصویر بردار استفاده شده است. نسبت سیگنال به نویز پاسخ تابشی تصویر بردار را نشان می‌دهد و پارامتری است که مستقیماً به کیفیت تصاویر به دست آمده مرتبط است. نتایج به دست آمده، موفقیت استفاده از این کره ادغام را در چنین سامانه‌های تصویر برداری نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: کره ادغام، منبع نور یکنواخت، کالیبراسیون، تصویر بردار فضایی، بازتابنده لامبرتین.

۱- مقدمه

کره ادغام یک کره توخالی است که سطح داخلی آن با پوشش سفید بسیار بازتابنده پوشیده شده است و نور را به‌طور یکسان در همه جهات پخش می‌کند. در نتیجه بازتاب‌های متوالی از سطح داخلی کره، در بخش خروجی که تصویر بردار قرار می‌گیرد، روشنائی یکنواخت بدون ویژگی‌های قابل تشخیص وجود دارد. بنابراین، وقتی تصویر بردار به کره نگاه می‌کند، طول موج‌های دقیقاً یکسان با شدت برابر به هر پیکسل در صفحه کانونی برخورد می‌کنند. در نهایت، حساسیت هر یک از پیکسل‌های آشکارساز، تا زمانی که تصویر حاصل، میدان نور ثابت را بازتولید کند، به‌طور جداگانه تنظیم می‌شود [۵۴].

قدیمی‌ترین کاربرد کره ادغام، اندازه‌گیری کل شار هندسی نور لامپ‌های الکتریکی است. این تکنیک در آغاز قرن بیستم توسط ریچارد اولبریخت در آلمان، به‌عنوان روشی ساده و سریع برای مقایسه خروجی لومن انواع لامپ‌های مختلف به کار رفت. این روش

تصویر بردارهای سنجش‌ازدور با میدان دید بزرگ که بر روی ماهواره‌ها قرار می‌گیرند، کاربرد گسترده‌ای در بخش‌های نظارت دارند و آزمون پیش از به‌کارگیری و کالیبراسیون تابشی آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد [۱]. کالیبراسیون مناسب رادیو متریک، دقت رنگ تصویر را بهبود می‌بخشد، رنگ واقعی تصاویر را نشان می‌دهد و تصویر بردار را به یک ابزار علمی دقیق تبدیل می‌کند. برای تنظیم تصویر بردار، به یک منبع نور یکنواخت گسترده بدون عدسی نیاز است که به‌طور همگن به تصویر بردار بتابد. هر پیکسل حسگر باید یک مقدار نور مساوی را دریافت کند. در واقع در تصویر بردار کالیبره شده، عدد دیجیتالی هر پیکسل را می‌توان به یک مقدار تابش مشخص نسبت داد. استفاده از کره ادغام^۲ برای کالیبراسیون تصویر بردارهای فضایی راه‌حلی دقیق و کارآمد است [۲ و ۳].

² Integrating sphere

استاد: بشیری، عباس، جدیدی، فائزه، محمدی، علی، سیدافقهی، سید محمد، "طراحی و ساخت کره ادغام جهت کالیبره کردن تصویر بردارهای فضایی"، الکترومغناطیس کاربردی، ۱۲، (۲)، ۹۹-۱۰۹، ۱۴۰۳. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.11.1>

همچنان به طور گسترده در صنعت برای کنترل کیفیت لامپ در طول ساخت استفاده می‌شود [۶].

از کره‌ی ادغام می‌توان در انواع اندازه‌گیری‌های اپتیکی، فوتومتری یا رادیومتری به دلیل عملکرد فوق‌العاده آن به‌عنوان تابنده یکنواخت استفاده کرد [۷]. این کره‌ها را می‌توان با ابعاد متفاوتی ساخت و از آن‌ها در کاربردهای زیادی مانند طیف‌سنجی، جمع‌آوری نور از منبع داخلی یا خارجی، اندازه‌گیری شار LED و طیف آن، اندازه‌گیری بازتاب و عبور نمونه‌ها، اندازه‌گیری توان کلی پرتوی لیزر بدون تأثیر شکل پرتو، جهت تابش، موقعیت برخورد و قطبش آن، تعیین مشخصات اپتیکی بافت‌های زیستی، اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نویز، ایجاد منابع نوری یکنواخت و ... استفاده کرد [۸-۱۲].

ابزارهای مشاهده زمین و حسگرهای اپتیکی سنسور از دور باید بر اساس کالیبراسیون رادیومتری دقیقی باشند که معمولاً توسط گسیل پهن باند کره ادغام با دهانه بزرگ حاصل می‌شود [۱۳]. همچنین از آنجاکه حسگرهای ابر طیفی هواپرد بر بی‌نهایت کانونی می‌شوند، از کره ادغام جهت کالیبراسیون دقیق آن‌ها استفاده می‌شود [۱۴]. کره ادغام برای کالیبره کردن انواع تصویربردارهای پیچیده، مانند تصویربردارهای ماهواره‌ها، تصویربردارهای چند طیفی و ابر طیفی، تصویربردارهای نقشه‌بردار هوایی، شبیه‌سازهای خورشیدی، طیف‌سنج‌های تصویربردار و ... به کار می‌رود [۱۵-۲۰].

در سال‌های اخیر ساخت تعدادی کره ادغام گزارش شده است. به‌عنوان مثال، تینگ لیانگ و همکارانش [۲۱] ساخت یک کره ادغام با یکنواختی ۹۸٪ را برای کالیبراسیون تابش طیفی حسگرهای سنسور از راه دور ماهواره‌هایی با میدان دید بزرگ گزارش کردند. الکس کوت و همکارانش [۲۲] از کره ادغام به‌عنوان منبع نور یکنواخت در تصویربرداری فرا طیفی در ناحیه طیفی ۵۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر برای ایجاد مکعب داده پنج بعدی باهدف دستیابی به اطلاعات طیفی، مکانی و زاویه‌ای استفاده کردند. کرمر و همکارانش [۱۹] نیز برای کالیبراسیون تلسکوپ خود از کره ادغام با قطر ۳۰۰ میلی‌متر به‌عنوان ماه مصنوعی استفاده کردند. باتلر و همکارانش [۴] از کره ادغام برای کالیبره کردن طیف‌سنج تصویربردار با تفکیک مکانی متوسط و نقشه‌بردار ماهواره لند ست ۷ استفاده کردند. آن‌ها در این پژوهش پایداری رادیومتری و تکرارپذیری کره‌ها را نیز مطالعه کردند. جیالی چن و همکارانش [۲۳] برای جلوگیری از اثر پرتوی جانبی و ابیراهی‌های سامانه ادغام‌گر اپتیکی که در کالیبراسیون شبیه‌ساز خورشیدی به کار می‌رود و باعث عدم یکنواختی تابش می‌شود، استفاده از کره ادغام را برای تابش نور با یکنواختی ۹۸٪/۱ پیشنهاد کردند. خطای مکان تصویر، تطابق ضعیف محور اپتیکی، ابیراهی‌ها، نور سرگردان و خطای انسانی و عوامل دیگر در ادغام‌گر اپتیکی منجر

به عدم یکنواختی مناسب می‌شود که اصلاح آن‌ها بسیار مشکل است. در سال ۲۰۲۲ ساخت یک کره ادغام با قطر ۲/۲ m و دهانه خروجی ۰/۸ m در ناحیه طول‌موجی ۱۶۰-۳۵۰ نانومتر گزارش شد. این کره قابلیت کالیبراسیون طیف‌سنج UV-VIS که در ماهواره چینی GF-5 استفاده می‌شود، را دارد [۲۴]. ویکتور ساندرگین [۲۵] نیز یک کره ادغام در ناحیه طول‌موجی ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر با یکنواختی ۹۵/۴٪ ساخت. فو و همکارانش [۲۶] نیز ساخت یک کره ادغام با یکنواختی ۹۵٪ را در دهانه خروجی کره‌ی ادغامی که ساخته بودند، گزارش کردند. در سال ۲۰۲۳ نیز از کره ادغام برای کالیبراسیون طیف‌سنج HR-1024i استفاده شد. این طیف‌سنج برای ایجاد طیف بازتاب جهت تأیید داده‌های ابر طیفی ماهواره استفاده می‌شود و در سامانه‌های مشاهده زمین و سنسور از دور کاربرد دارد [۱۳].

در این پژوهش طراحی و ساخت کره ادغام با یکنواختی بسیار بالا به‌منظور کاربرد در کالیبراسیون محموله‌ی تصویربرداری انجام شده است. استفاده از شیوه خاص پوشش‌دهی داخل کره علاوه بر ایجاد یکنواختی بالا، از صرف هزینه‌های جانبی بسیار زیادی جلوگیری کرده است که این کار به نوبه خود هزینه ساخت کره را بسیار پایین آورده است. تا کنون ساخت کره ادغام با اندازه قطر mm ۶۰۰ برای اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نویز تصویربردارهای فضایی گزارش نشده است. در ادامه تئوری طراحی، شبیه‌سازی، ساخت و نتایج ارزیابی کره ادغام بررسی خواهد شد.

۲- طراحی کره ادغام

کره ادغام برای ایجاد منبع تابشی با شدت ظاهری یکنواخت استفاده می‌شود. نور جمع‌آوری‌شده توسط کره، پاره‌ها به‌صورت پخشی منعکس و در نهایت، ویژگی‌های فضایی نوری که در آشکارساز جمع می‌شود، ادغام می‌شود. دهانه ورودی، منبع نور کره ادغام است. بنابراین، نسبت به‌اندازه دهانه خروجی نور و شعاع کره ادغام، نسبتاً کوچک است و تأثیر کمی بر عملکرد کره دارد. زاویه، توزیع فضایی و شدت پرتوی نور ورودی عملاً تأثیری بر یکنواختی نور خروجی ندارند. در طراحی کره ادغام باید پرتوهای منبع نور تا حد امکان دریافت و از کاهش بازدهی انتقال انرژی ناشی از دهانه خروجی بزرگ اجتناب شود.

تابش دهانه خروجی نور تحت تأثیر اندازه دهانه خروجی، بازتاب دیواره داخلی و روشنایی منبع نور است. اندازه دهانه خروجی بر بازده انتقال انرژی و یکنواختی کره ادغام تأثیر می‌گذارد. اگر دهانه تصویربرداری که مقابل کره ادغام قرار می‌گیرد، بزرگ باشد، دهانه خروجی نیز باید بزرگ باشد. بنابراین، اندازه کره نیز باید بزرگ باشد، در غیر این صورت نور خروجی، یکنواختی خود را از دست می‌دهد. قطر کره‌های ادغام از چندین سانتی‌متر تا چندین متر متغیر است و

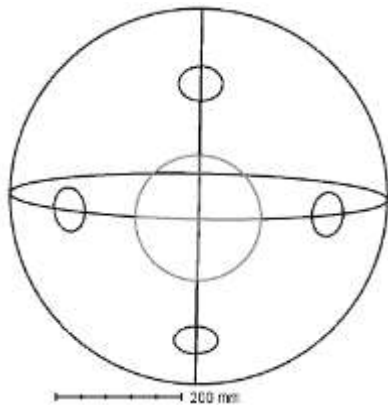
شعاع بهترین دهانه خروجی برای کره‌هایی با شعاع ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر، در محدوده ۷۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر قرار دارد و ضریب تداخل روشنائی که معیاری از تضییع تابش در داخل کره است، در این محدوده نسبتاً کم است [۴ و ۲۳].

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و الزامات مورد نیاز برای کالیبراسیون تصویربردار موردنظر از جمله اندازه دهانه ورودی دوربین، کره‌ای با شعاع ۳۰۰ mm و اندازه دهانه خروجی با شعاع ۱۰۰ mm برای ساخت و ارزیابی انتخاب شد. شعاع لامپ به‌عنوان منبع ورودی برابر با ۳/۵ cm است. بنابراین، نسبت اندازه دهانه و شعاع کره ادغام ۱:۳ و نسبت سطح دهانه ورودی و خروجی به سطح داخلی کره ادغام برابر با ۰/۴۱ است که زیر ۵٪ است. بازده انتقال انرژی کره نیز با استفاده از روابط مربوطه ۵۲٪ است. با توجه به مرجع [۲۳]، تمام این مقادیر در محدوده مناسبی قرار دارند.

۳- شبیه‌سازی کره ادغام

به‌منظور بررسی روند طراحی، مدلی با استفاده از بخش غیر ترتیبی نرم‌افزار اپتیک استودیو زیمکس برای شبیه‌سازی و تحلیل یکنواختی تابش در دهانه خروجی کره ادغام ایجاد شد.

کره ادغام موردنظر از یک حفره کروی با سطح داخلی بسیار بازتابنده، اما پراکنده‌کننده و چهار دهانه‌ی ورودی و یک دهانه خروجی نور تشکیل شده است که در شکل (۱) آمده است. قطر این کره ۶۰۰ cm و قطر دهانه خروجی ۲۰ cm است.



شکل (۱). نمایی از کره ادغام طراحی شده در نرم‌افزار زیمکس

با روشن کردن منبع نور، پرتوها به سطح کره برخورد می‌کنند و تحت بازتاب لامبرتی^۱ سطح داخلی کره قرار می‌گیرند. نمای سه‌بعدی طرح کره ادغام نیز در شکل (۲) آورده شده است.

به کاربرد آن بستگی دارد. البته موقعیت دهانه خروجی نور تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های نور خروجی ندارد.

با در نظر گرفتن اثر تمام این شرایط و ملزومات مورد نیاز، کره ادغام باید تا حد امکان ساده طراحی شود.

برای تعیین اندازه دهانه ورودی، خروجی و قطر کره باید دو قانون را در نظر گرفت: اولاً، سهم مساحت نواحی ورودی و خروجی نور به مساحت کره کمتر از ۵٪ باشد. دوماً، نسبت قطر دهانه خروجی به قطر کره کمتر از ۱:۳ باشد. قانون ۱:۳ برای دستیابی به یکنواختی بیش از ۹۸٪ ضروری است [۲۷].

با توجه به نظریه بازتاب پخشی و قضیه پایداری روشنائی، اگر شار تابشی ورودی $\Phi_{s-input}$ باشد و نور چندین بار در کره ادغام پخش شود، شار تابش خروجی، $\Phi_{s-output}$ برابر است با:

$$\Phi_{s-output} = \frac{\Phi_{s-input} \rho}{A_s [1 - \rho(1 - f_{all})]} \cdot \pi R^2 [1 - (1 - 2f_{eff})^2]$$

که R شعاع، ρ بازتاب پوشش دیواره داخلی و A_s مساحت سطح داخلی کره ادغام است. f_{eff} نسبت دهانه موثر کره ادغام و برابر است با:

$$f_{eff} = \frac{\sum_{j=0}^n (R - \sqrt{R^2 - r_j^2})}{2R}$$

f_{all} نسبت کل دهانه است که شامل اندازه دهانه ورودی و اندازه دهانه خروجی است:

$$f_{all} = \frac{\sum_{i=0}^n (R - \sqrt{R^2 - r_i^2}) + \sum_{j=0}^n (R - \sqrt{R^2 - r_j^2})}{2R}$$

i تعداد دهانه‌های ورودی، j تعداد دهانه‌های خروجی نور، r_i شعاع دهانه ورودی نور به کره ادغام و r_j شعاع دهانه خروجی نور از کره ادغام است.

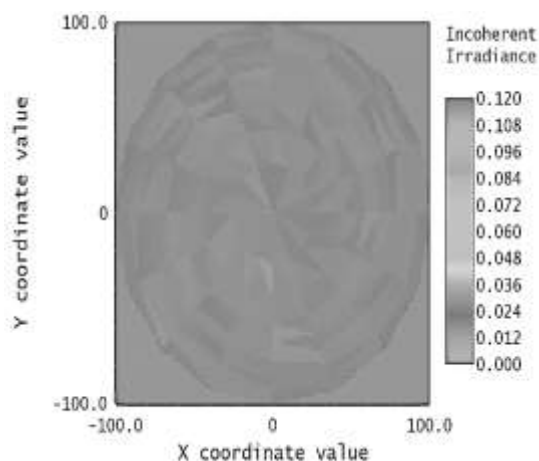
در نهایت، بازده انتقال انرژی کره ادغام به صورت $\eta_{sp} = \frac{\Phi_{s-output}}{\Phi_{s-input}}$ تعریف می‌شود که برابر است با:

$$\eta_{sp} = \frac{\rho \left(\frac{r_j}{R}\right)^2}{4 - 2\rho \left[\sqrt{1 - \left(\frac{r_i}{R}\right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{r_j}{R}\right)^2} \right]}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بازده انتقال انرژی به‌اندازه دهانه ورودی و خروجی نور و شعاع کره بستگی دارد. این رابطه مرجعی برای طراحی اندازه دهانه و سایر پارامترهای کره ادغام است. بنابراین، اندازه دهانه خروجی و شعاع کره ادغام باید به‌طور منطقی تجزیه و تحلیل شود.

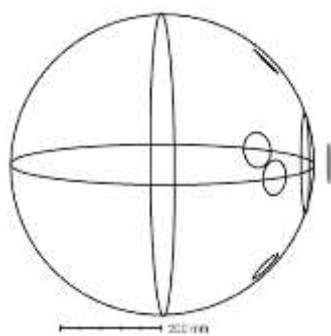
^۱ Lambertian

آشکارساز با چنین مشخصاتی در دهانه خروجی نور قرار گیرد، تمام ناحیه آن به‌طور یکنواخت روشن خواهد شد. به عبارتی تمام پیکسل‌ها در ناحیه‌ای با شعاع ۱۰۰ mm شدت یکسانی دریافت خواهند کرد.



شکل (۵). تصویر بر تابندگی لکه خروجی کره ادغام در آشکارسازی با مشخصات فیزیکی دهانه برحسب وات بر مترمربع

در مرحله بعد تأثیر تغییر اندازه، شعاع و فاصله آشکارساز یا اپتیک دریافت‌کننده تابش خروجی تا دهانه خروجی کره ادغام بررسی شد. به‌عنوان مثال آشکارساز به‌عنوان یک سطح تخت کوچک‌تر با قطر ۵ cm در فاصله ۳ cm از دهانه خروجی قرار داده شد که تصویر آن در شکل (۶) آورده شده است.



شکل (۶). آشکارساز تخت با شعاع ۴ cm در فاصله ۳ cm از دهانه خروجی کره ادغام

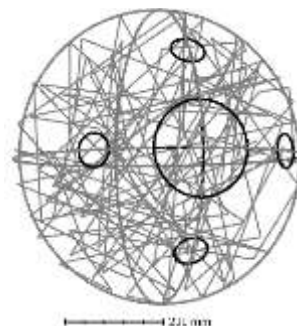
در نهایت، نمایی از لکه خروجی این چیدمان نیز در شکل (۷) آورده شده است. در این شکل در ناحیه‌ای با شعاع ۵۰ mm می‌توان میزان یکنواختی بسیار بالای تابش خروجی را مشاهده نمود.



شکل (۲). نمای سه‌بعدی کره ادغام شبیه‌سازی شده توسط زیمکس

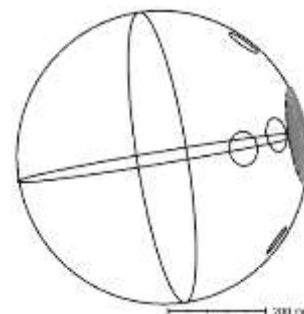
برای تحلیل کره ادغام شبیه‌سازی شده بیش از ۴ میلیون پرتو در بخش غیر ترتیبی زیمکس با استفاده از بازتاب پخشی دیواره ردیابی شد. صرف‌نظر از مسیر ردیابی پرتو، سطح داخلی تمام تابش را به‌طور یکنواخت در سراسر کره پراکنده می‌کند و عدم یکنواختی‌های فضایی را از طریق یکپارچگی فضایی از بین می‌برد.

طرح ردیابی پرتوی کره ادغام با در نظر گرفتن ۴ پرتوی نمایشی در شکل (۳) به تصویر کشیده شده است.



شکل (۳). ردیابی پرتو در کره ادغام

در مرحله اول شبیه‌سازی کره ادغام که در شکل (۴) آمده است، شعاع و ابعاد آشکارساز با دهانه خروجی یکسان تعریف شده است. بنابراین، در دهانه خروجی کره یک آشکارساز دایروی با اندازه شعاع ۱۰۰ mm قرار دارد که پرتوها به آن برخورد می‌کنند.



شکل (۴). تعریف شعاع و اندازه آشکارساز برابر با دهانه خروجی نور

در این حالت لکه خروجی بسیار یکنواخت خواهد بود، که تصویر آن در شکل (۵) آورده شده است. ناحیه بزرگ خاکستری‌رنگ نشان‌دهنده شکل و اندازه لکه یکنواخت تشکیل شده است. این شکل نشان‌دهنده این است که اگر

با توجه به نتایج به دست آمده از این شبیه سازی ها می توان از این کره به تنهایی به عنوان منبع نور یکنواخت استفاده کرد. محل قرار گرفتن تصویربردار برای دریافت تابش یکنواخت را می توان با توجه به اندازه دهانه ورودی آن با استفاده از زیمکس به دست آورد. در ادامه با توجه به بررسی نتایج شبیه سازی و مطلوب بودن نتایج به دست آمده، کره ادغام مورد نظر ساخته شد که مراحل آن شرح داده می شود.

۴- ساخت کره ادغام

کره ادغام ساخته شده یک پوسته فلزی توخالی است که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) آمده است و اجزای آن در ادامه بررسی خواهند شد.

جدول (۱). مشخصات کره ادغام

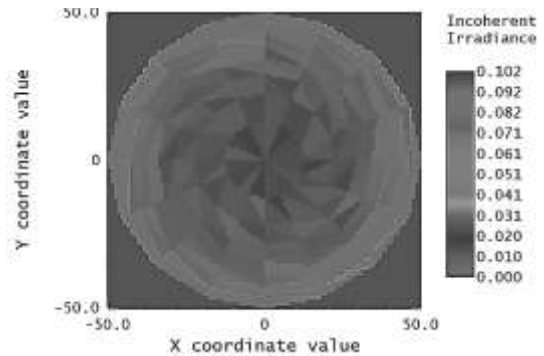
۶۰cm	قطر داخلی
۲۰cm	قطر دهانه خروجی
سولفات باریوم	پوشش دیواره داخلی
۱۰۰ وات	مشخصات لامپ
چرخش هوا توسط فن	سرمایش حرارتی
حدود ۵ کیلوگرم	وزن کره بدون پایه
۷۷cm با ارتفاع ۱۵۸cm	ابعاد کلی با پایه

همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می شود، کره ادغام دارای پوشش لامبرترین، چهار لامپ استاندارد و یک دهانه دایروی خروجی است.



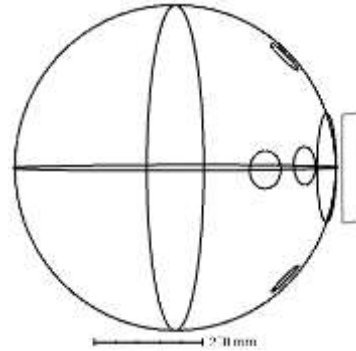
شکل (۱۰). تصویری از کره ادغام ساخته شده

۴-۱. پوشش کره



شکل (۷). تصویر بر تابندگی لکه خروجی کره ادغام در آشکارساز دایروی در فاصله ۳ سانتی متری از کره ادغام برحسب وات بر مترمربع

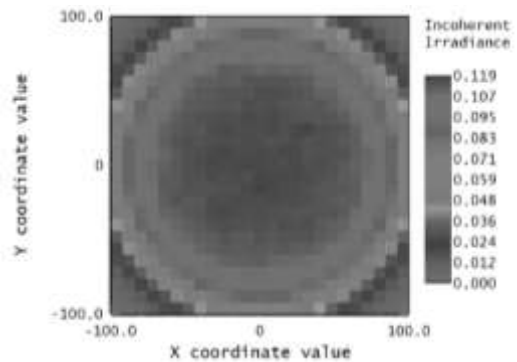
برای مقایسه اثر شکل آشکارساز، یک آشکارساز مربعی با اندازه ضلع ۲۰ سانتی متر مطابق شکل (۸) در فاصله ۵ سانتی متری از دهانه خروجی کره قرار گرفت.



شکل (۸). کره ادغام با آشکارساز تخت مربعی

میزان تابش دریافتی در پیکسل های چنین آشکارسازی با اندازه ضلع ۲۰۰ mm نیز در شکل (۹) آمده است.

همان طور که مشخص است میزان تابش با دقت بسیار بالایی در دایره ای با شعاع ۷ cm یکنواخت است. بنابراین، پیکسل های این ناحیه تابش با شدت یکسانی دریافت می کنند ولی پیکسل های خارج از این ناحیه تابشی با شدت کمتر را دریافت می کنند و مقدار تابش دریافتی در آن ها افت پیدا می کند.



شکل (۹). تصویر بر تابندگی لکه خروجی کره ادغام در آشکارساز مربعی برحسب وات بر مترمربع



شکل (۱۲). طرح قرار گرفتن لامپ‌های هالوژن-تنگستن-کوارتز در کره ساخته شده

در دهانه خروجی، معمولاً می‌توان از دو نوع آشکارساز استفاده کرد: فوتومتر پهن باند یا اسپکترومتر باند باریک. از پاسخ طیفی فوتومتر می‌توان به سهولت برای اندازه‌گیری شار لامپ استفاده کرد. از داده‌های اسپکترومتر نیز می‌توان توزیع توان طیفی و کالری‌متری لامپ را به دست آورد [۲۹].

طیف‌سنج Ocean Optics HR2000+ پاسخ طیفی و وضوح نوری بالایی دارد و برای ثبت اطلاعات جریان فوتون‌ها در کره ادغام ساخته شده به کار رفته است. این طیف‌سنج فیبر نوری مینیاتوری، از ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر را پاسخگو است و وضوح نوری آن ۰/۰۳۵ نانومتر است. فیبر نوری اسپکترومتر مستقیماً به دهانه خروجی کره ادغام که روشنایی همگن و پهن بانندی فراهم می‌کند، متصل می‌شود. طیف‌سنج توسط فیبر نوری مقدار نور را اندازه‌گیری و داده‌های جمع‌آوری شده را به اطلاعات دیجیتال تبدیل می‌کند.

۵- ارزیابی عملکرد کره ادغام ساخته شده

سامانه کره ادغام ساخته شده به منظور کاربرد در کالیبراسیون تصویربردارهای اپتیکی با ارزیابی نسبت سیگنال به نویز محموله تصویربردار با قطر ۶۰۰ mm و دهانه خروجی با شعاع ۱۰۰ mm ساخته شد. جهت ارزیابی عملکرد این سامانه، در ناحیه طول موجی ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر، در محدوده VIS-NIR-SWIR، آزمون‌هایی برای سنجش پایداری مکانی و پایداری زمانی شار فوتون‌های دریافتی، طراحی و اجرا شد.

خواص اپتیکی پوشش کره بر دقت آن تأثیر بسیار زیادی دارد. بازدهی کره ادغام تحت تأثیر بازتاب و ماهیت انتشار پوشش داخلی که باید لامبرتین یا بازتابنده پخشی ایدئال باشد، قرار دارد. روشنایی ظاهری سطح لامبرتین بدون توجه به زاویه دید ناظر یکسان است. این قانون، زیربنای توزیع یکنواخت روشنایی در زوایای دید متفاوت است.

یکی دیگر از ویژگی‌های ماده پوشش، عدم وجود فلورسانس است. مواد فلورسنت، طول موج کوتاه نور را جذب و طول موج‌های بلندتر را بازتاب می‌کنند. به دلیل پراکندگی‌های متعدد، این اثر در کره ادغام بیشتر از بقیه موارد تأثیرگذار است. بنابراین، باید از پوشش یکنواخت داخلی با بازتاب پخشی بسیار بالا استفاده کرد.

داخل کره ادغام ساخته شده باریک فتومتر مخصوص مبتنی بر سولفات باریوم پوشانده شده است. این رنگ یک پوشش سفید پراکنده اختصاصی با کیفیت مطلوب در ناحیه طول موج VIS-NIR-SWIR ایجاد می‌کند. بازتاب اسمی سولفات باریوم برابر با ۹۸٪ است [۲۸]. نمایی از داخل کره ادغام که توسط این ماده پوشیده شده است در شکل (۱۱) آمده است.



شکل (۱۱). نمایی از پوشش داخلی کره ادغام

۴-۲. منبع روشنایی

منابع روشنایی پر قدرت ممکن است پوشش داخلی کره را گرم کرده یا به آن آسیب برسانند. بنابراین، معمولاً از لامپ‌های هالوژن تنگستن استفاده می‌شود که در اطراف ناحیه خروجی قرار می‌گیرند. کره ادغام ساخته شده از چهار لامپ مجزای هالوژن-تنگستن-کوارتز استفاده می‌کند. این لامپ‌ها هنگام تنظیم بودن منبع تغذیه جریان، طیف پیوسته باثبات زمانی بالایی دارند. طرح قرار گرفتن این لامپ‌ها در کره ساخته شده در شکل (۱۲) آمده است.

چهار عدد لامپ هالوژن ۱۰۰ وات در سطح قرار گرفته و با جریان هوایی که توسط فن‌ها در محفظه مناسب ایجاد می‌شود، خنک می‌شوند. از منبع تغذیه Mean Well RS-15-12 برای روشنایی فن‌ها و سرمایش حرارتی مورد نیاز استفاده شده است.

$$U_2 = 1 - \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{av}}$$

$$Bias = \pm \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}$$

که در آن، E_{max} حداکثر و E_{min} حداقل مقدار تابش است. E_{av} مقدار متوسط تابش است. هر چه مقادیر U_0 ، U_1 و U_2 به ۱ نزدیکتر باشد، توزیع نور یکنواخت‌تر است. هر چه مقدار بایاس بزرگ‌تر باشد، توزیع نور ناهموارتر است [۲۳].

با توجه به بررسی یکنواختی کره ادغام در ۹ نقطه متفاوت با استفاده از اسپکترومتر، نقشه یکنواختی این کره به صورت زیر در شکل (۱۵) آورده شده است. در این نقشه اختلاف میانگین شدت تابش دریافتی هر یک از نقاط در نظر گرفته شده برای آزمایش پایداری مکانی در بخش خروجی کره ادغام نسبت به نقطه مرکزی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف بسیار اندکی بین نقاط مختلف از نظر تابش دریافتی وجود دارد و این کره پایدار است.

		-۰,۰۰۰۲		
		۰,۰۰۲۵		
۰,۰۰۱۶	۰,۰۰۲۱	۰	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۱۸
		-۰,۰۰۰۱		
		-۰,۰۰۰۱		

شکل (۱۵). نقشه یکنواختی کره ادغام

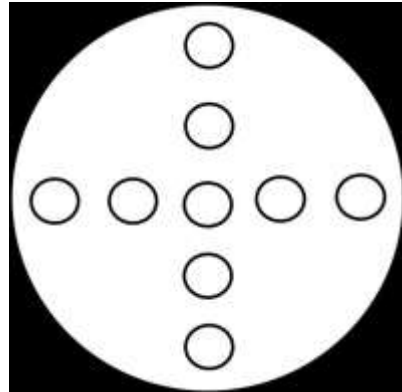
برای به دست آوردن درصد تقریبی میزان یکنواختی این کره از رابطه زیر استفاده شده است:

$$U = 1 - \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{av}}$$

که E_{max} بیشترین مقدار تابش، E_{min} کمترین مقدار تابش و E_{av} میانگین مقدار تابش است. با توجه به داده‌های اسپکترومتر مقادیر U_0 ، U_1 و U_2 به ترتیب برابر با ۰/۹۹۵، ۰/۹۹۱ و ۰/۹۹۱ است. همچنین درصد یکنواختی این کره ۹۹٪ است که نتیجه بسیار مطلوبی است.

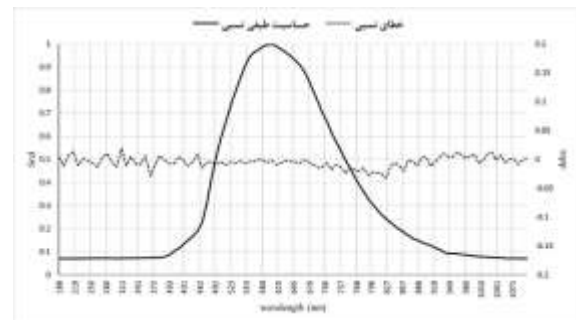
ساخت مقرون‌به‌صرفه و یکنواختی بسیار بالای کره ادغام ساخته شده آن را قابل مقایسه و حتی برتر از نمونه‌های مشابه خارجی ساخته است. با توجه به این امر، اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نویز تصویربردارهای فوق دقیق که امری بسیار مهم در تصویربرداری فضایی است، با استفاده از این سامانه پیشنهاد می‌شود.

بدین منظور در دهانه خروجی کره ۹ نقطه در فواصل مختلف، پنج نقطه افقی و چهار نقطه عمودی مانند شکل (۱۳)، در نظر گرفته شد که اسپکترومتر در آنجا قرار گرفت تا پایداری مکانی با دقت بسیار بالا با بررسی طیف خروجی ارزیابی شود. به‌منظور بررسی پایداری زمانی، این آزمون در هر نقطه ۱۰ مرتبه اجرا شد.



شکل (۱۳). طرح بررسی پایداری مکانی کره ادغام

در ادامه میانگین نمودار حساسیت طیفی نسبی (تعداد فوتون‌های دریافتی) و خطای نسبی برحسب طول‌موج، در ناحیه طول‌موجی ۱۸۸ تا ۱۱۰۰ نانومتر، جهت ارزیابی و تأیید عملکرد کره ادغام در شکل (۱۴) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین خطای این سامانه ناچیز و بسیار کمتر از ۳٪ است.



شکل (۱۴). پاسخ طیفی و خطای نسبی کره ادغام

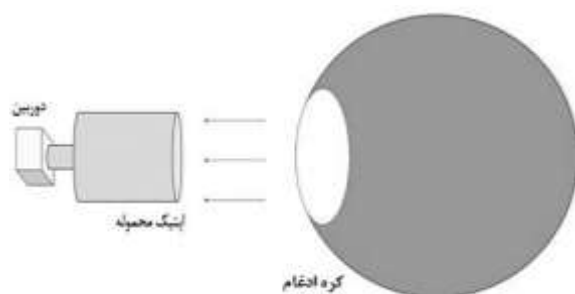
این شکل کیفیت بسیار مطلوب کره‌ی ادغام ساخته شده را نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی نشان‌دهنده یکنواختی بسیار بالای کره ادغام ساخته شده است.

۱-۵. نقشه‌برداری یکنواختی کره ادغام

به‌طورکلی، یکنواختی تابش با تفاوت میانگین یکنواختی تابش U_0 ، اختلاف دامنه یکنواختی تابش U_1 ، اختلاف دامنه یکنواختی تابش U_2 و بایاس عدم یکنواختی تابش قضاوت می‌شود.

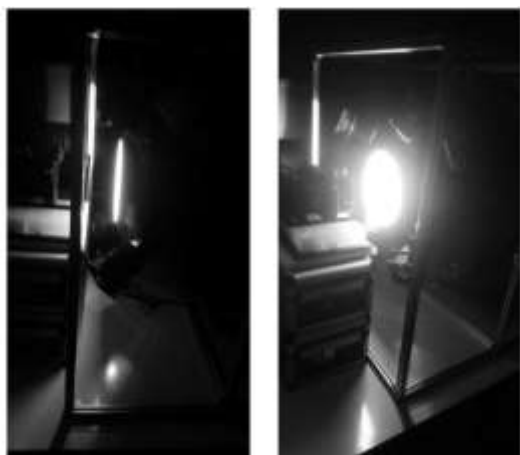
$$U_0 = \frac{E_{av}}{E_{max}}$$

$$U_1 = \frac{E_{min}}{E_{max}}$$



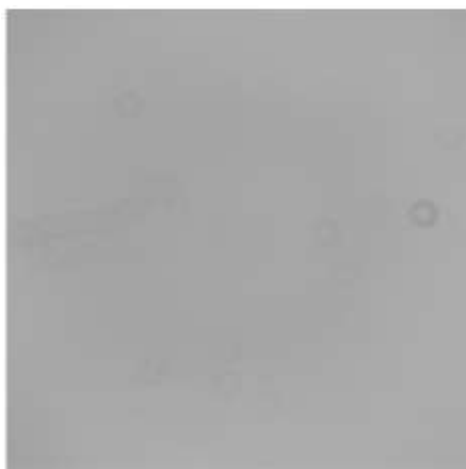
شکل (۱۶). طرح‌واره چیدمان آزمون SNR زیرسامانه تصویربرداری

چیدمان آزمایشگاهی این آزمون نیز در شکل (۱۷) آورده شده است. بازه طیفی عملکرد موازی‌ساز ۲/۵-۰/۳۵ میکرومتر، دمای آزمایشگاه ۲۲-۲۳ درجه سانتی‌گراد و فشار محیط ۱ اتمسفر بود.



شکل (۱۷). تصویر چیدمان آزمون

نتیجه تصویر تصویربرداری مونوکروم در آزمایش صورت گرفته در شکل (۱۸) آورده شده است. ابعاد تصویر ۲۰۴۸×۲۰۴۸، اندازه پیکسل حسگر ۷/۴ میکرومتر و زمان نورگیری ۳۶۰ میکروثانیه است.



شکل (۱۸). نمونه تصویر تصویربرداری مونوکروم

همان‌طور که می‌دانیم مقدار SNR برابر است با [۳۱]:

$$SNR = \frac{S}{N}$$

۶- اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نویز تصویربردار

موردنظر

بخش کلیدی در هر آشکارساز، نسبت سیگنال به نویز یا SNR است. SNR عملکرد حساسیت یک آشکارساز را اندازه‌گیری می‌کند. این یکی از پارامترهای مهم در آشکارساز سامانه‌های سنجش از راه دور است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری عملکرد نویز آشکارساز وجود دارد. روش کلی، ارزیابی سطوح سیگنال و نویز برای یک سطح سیگنال معین است که به معنای SNR است [۳۰].

آزمون اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نویز (SNR) یکی از کمیت‌های مهم در سنجش عملکرد یک تصویربردار در تصاویر ثبت‌شده است. دانستن عملکرد واقعی دوربین فضایی لازم است، ولی محیط کاری در مدار را به‌سختی می‌توان شبیه‌سازی کرد. کره ادغام قادر به ارائه نور با تنظیم مداوم و متناسب است و می‌توان تصاویر مربوط به شرایط مختلف روشنایی را ثبت کرد. برای بررسی عملکرد محموله از لحاظ نسبت سیگنال به نویز لازم است با اخذ تصویر از یک منبع نور یکنواخت (کره ادغام) در سطوح مختلف تابشی (سیگنال ورودی) و با استفاده از محاسبات مربوطه، نمودار SNR برحسب سطح تابش به دست بیاید. درنهایت، با محاسبه سطح تابش ورودی به محموله در شرایط مختلف سناریوی مأموریت، SNR محموله در شرایط مأموریت از نمودار استخراج می‌شود.

استفاده از کره ادغام دو مزیت مهم دارد. اولاً، تابش سطح داخلی متناسب با توان کل تابشی توسط منبع داخلی کره است و توزیع هندسی و جهتی منبع اولیه بر سطح تابشی کره تأثیری ندارد. دوماً، دهانه خروجی کره مانند یک منبع لامبرتین عمل می‌کند [۳۰].

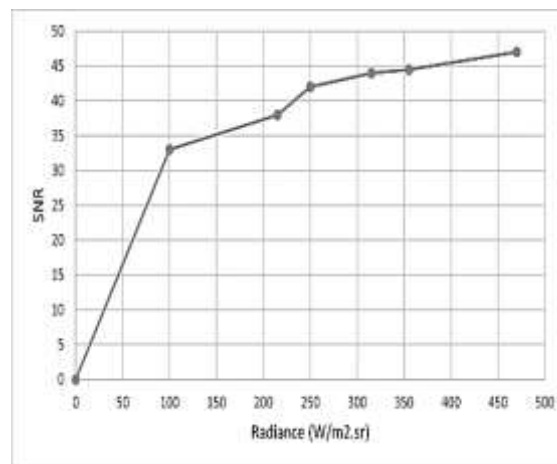
برای انجام این آزمون ابتدا کره ادغام در موقعیتی مناسب روی میز قرار گرفت. سپس تصویربرداری به صورتی که ورودی عدسی دقیقاً در وسط خروجی کره ادغام قرار داشته باشد و هم‌محور باشند، مقابل کره ادغام قرار گرفت. طرح‌واره چیدمان این آزمون در شکل (۱۶) آورده شده است. دوربین به سامانه پردازش سیگنال متصل است. سامانه پردازش سیگنال از برد اکتساب داده و رایانه تشکیل شده است که جمع‌آوری، تبدیل و پردازش داده‌های تصویر را انجام می‌دهد.

۵- مراجع

- [1] Y. He et al., "Design and characterization of a large-area integrating sphere uniform radiation source for calibration of satellite remote sensors," *Proceedings of SPIE*, May 2010, doi: <https://doi.org/10.1117/12.863270>.
- [2] "Improved Calibration Shows Images' True Colors | NASA Spinoff," spinoff.nasa.gov/Spinoff2015/ip_2.html
- [3] Vania Da Deppo et al., "Characterization of the integrating sphere for the on-ground calibration of the SIMBIOSYS instrument for the BepiColombo ESA mission," *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2057349>.
- [4] J. J. Butler et al., "Radiometric measurement comparison on the integrating sphere source used to calibrate the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and the Landsat," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 108, no. 3, p. 199, May 2003, doi: <https://doi.org/10.6028/jres.108.020>.
- [5] Lukasz Gryko, Urszula Joanna Blaszcak, and Andrzej Stanislaw Zajac, "Colorimetric characterization of the tunable LED-based light source at the output of the homogenizing rod," *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2501631>.
- [6] M. L. Rastello, E. Miraldi, and P. Pisoni, "Luminous-flux measurements by an absolute integrating sphere," *Applied Optics*, vol. 35, no. 22, p. 4385, Aug. 1996, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.35.004385>.
- [7] P.-S. Shaw, Z. Li, U. Arp, and K. R. Lykke, "Ultraviolet characterization of integrating spheres," *Applied Optics*, vol. 46, no. 22, p. 5119, Jul. 2007, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.46.005119>.
- [8] A. ul Rehman, I. Ahmad, and S. A. Qureshi, "Biomedical Applications of Integrating Sphere: A Review," *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, vol. 31, p. 101712, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.101712>.
- [9] Prasanna Mahavarkar, S. Sriram, B. Joshi, A. Hasan, R. B. S, and S. Chandra, "Designing a Sky-Scanning Fabry-Perot Interferometer System with a Large Size Integrating Sphere," *Social Science Research Network*, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4318495>.
- [10] A. Kokka, T. Pulli, T. Poikonen, J. Askola, and E. Ikonen, "Fisheye camera method for spatial non-uniformity corrections in luminous flux measurements with integrating spheres," *Metrologia*, vol. 54, no. 4, pp. 577-583, Jul. 2017, doi: <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7cb7>.
- [11] T. Yamakoshi et al., "Integrating Sphere Finger-Photoplethysmography: Preliminary Investigation towards Practical Non-Invasive Measurement of Blood Constituents," *PLOS ONE*, vol. 10, no. 12, p. e0143506, Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143506>.
- [12] A. Kokka, T. Pulli, E. Honkavaara, L. Markelin, P. Kärhä, and E. Ikonen, "Flat-field calibration method for hyperspectral frame cameras," *Metrologia*, vol. 56, no. 5, p. 055001, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab3261>.
- [13] C. Rammeloo and A. Baumgartner, "Spectroradiometer Calibration for Radiance Transfer

نویز معمولاً به صورت ریشه میانگین مربع نویز (RMS) اندازه گیری می شود که با انحراف استاندارد سیگنال یکسان است. در این سامانه ابتدا ماتریس اصلاح محاسبه شده و نویزهای ثابت حذف شده اند. در ادامه میانگین مقادیر شدت پیکسل های یک تصویر به دست آمده است تا سیگنال محاسبه شود. سپس انحراف معیار تمام مقادیر پیکسل ها نسبت به مقدار میانگین محاسبه شده است تا نویز به دست آید و در نهایت نسبت سیگنال به نویز با تقسیم این دو عدد بر هم در هفت سطح تابشی مختلف محاسبه شده است.

نمودار SNR تصویربردار موردنظر با استفاده از منبع یکنواخت ساخته شده در ناحیه VIS-NIR-SWIR، در شکل (۱۹) آورده شده است.



شکل (۱۹). نمودار SNR تصویربردار NIR

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش یک کره ادغام متخلخل با بازدهی انتقال انرژی و یکنواختی تابش بسیار بالا طراحی و ساخته شده است که توسط چهار لامپ هالوژن تنگستن روشن می شود. شعاع کره ادغام ۳۰۰ میلی متر و شعاع دهانه خروجی ۱۰۰ میلی متر انتخاب شده است. با توجه به حجم واقعی و اتلاف گرما، سطح دهانه های ورودی و خروجی نور بیش از ۵٪ سطح داخلی کره ادغام نیست و شعاع دهانه خروجی نور نیز از نسبت ۱:۳ به شعاع کره پیروی می کند. یکنواختی تابش کره ادغام ۹۹/۱ درصد و بازدهی انتقال انرژی ۵۲٪ است که هر دو مقدار بهینه هستند. نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزار زیمکس یکنواختی بالای کره شبیه سازی شده را نشان می دهد و این نتایج با دقت بالایی در کره ساخته شده تکرار شده است. در نهایت، از کره ساخته شده برای کالیبراسیون و به دست آوردن SNR یک نوع تصویربردار استفاده شده است که نتایج آزمون، موفقیت استفاده از کره ساخته شده را نشان می دهند.

- “Light field camera as a Fourier transform spectrometer sensor: instrument characterization and passive spectral ranging,” *Applied Optics*, vol. 53, no. 19, pp. 4327–4327, Jun. 2014, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.53.004327>.
- [23] J. Chen et al., “Design of Integrating Sphere Uniform Light System for Solar Simulator,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 1–7, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/jphot.2023.3237931>.
- [24] J. Li, H. Chen, L. Zhang, W. Huang, and B. Yang, “Spectral radiance standard transfer for an integrating sphere as a radiation source in the ultraviolet band,” *Metrologia* (Print), vol. 60, no. 1, pp. 015001–015001, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac9f4c>.
- [25] V. Sandgren, “Characterization of an integrating sphere radiation reference source,” 2011. Available: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/ebe3c815-7e95-4585-8a45-27bd90beb7f0/content>
- [26] Y. Fu et al., “Radiance uniformity measurement of a miniaturized integrating sphere light source for microscope radiance responsivity calibration,” *AOPC 2020: Optical Sensing and Imaging Technology*, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2580225>
- [27] K. Carr, “Integrating sphere theory and applications Part I: Integrating sphere theory and design,” *Surface Coatings International*, vol. 80, no. 8, pp. 380–385, Aug. 1997, doi: <https://doi.org/10.1007/bf02692694>.
- [28] J. Luo, J. Liu, X. Guo, Y. Liu, H. Jin, and D. Fan, “Preparation, Characterisation, and Application of Bifunctional BaSO₄ Sheets,” *Materials*, vol. 13, no. 13, p. 2903, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13132903>.
- [29] A. Rezaei-latifi, “Design of a type of optical optical spectrometer in the UV- A spectral region”, *Scientific Journal of Applied Electromagnetics*, Vol. 11, No.2, 2023, (In Persian).
- [30] D. Patel, S. Patidar, and P. Parmar, “SNR IMPROVEMENT FOR MONOCHROME DETECTOR USING BINNING,” Jan. 2015.
- [31] Yuheng Chen, Jiankang Zhou, Xinhua Chen, Yiqun Ji, and Weimin Shen "Measurement and study on signal-to-noise ratio of a spaceborne camera", *Proc. SPIE 8200, 2011 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging and Processing Technology*, 82000K (28 November 2011); <https://doi.org/10.1117/12.903709>
- Measurements,” *Sensors* (Basel, Switzerland), vol. 23, no. 4, p. 2339, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23042339>.
- [14] Yang Benyong, Zhang Liming, Chen Hongyao, and Qiao Yanli, “System Design of the Integrating Sphere Used for on-Board Calibration of Visible-SWIR Hyperspectral Remote Sensors,” *Guangxue xuebao*, vol. 29, no. 12, pp. 3545–3550, Jan. 2009, doi: <https://doi.org/10.3788/aos20092912.3545>.
- [15] A. Baumgartner, “Characterization of integrating sphere homogeneity with an uncalibrated imaging spectrometer,” Jun. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/whispers.2013.8080735>.
- [16] F. Sakuma et al., “EOS AM-1 preflight radiometric measurement comparison using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) visible/near-infrared integrating sphere,” *Proceedings of SPIE*, Nov. 1996, doi: <https://doi.org/10.1117/12.258101>.
- [17] Z. Zou, Hui Liang Shen, S. Li, Y. Zhu, and J. H. Xin, “Lighting Deviation Correction for Integrating-Sphere Multispectral Imaging Systems,” *Sensors* (Basel), vol. 19, no. 16, pp. 3501–3501, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/s19163501>.
- [18] D. Hidović-Rowe, J. E. Rowe, and M. Lualdi, “Markov models of integrating spheres for hyperspectral imaging,” *Applied Optics*, vol. 45, no. 21, p. 5248, Jul. 2006, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.45.005248>.
- [19] C. Cramer, K. Lykke, J. Woodward, and A. Smith, “Precise Measurement of Lunar Spectral Irradiance at Visible Wavelengths,” *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 118, pp. 396–396, Oct. 2013, doi: <https://doi.org/10.6028/jres.118.020>.
- [20] A. Pauluhn, E. Huber, P. L. Smith, and L. Colina, “Spectroradiometry with space telescopes,” *The Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 24, no. 1, Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/s00159-015-0086-2>.
- [21] Ting Liang Guo, Guo Jin Feng, Y. Wang, and Ying Wei He, “A New Kind of Integrating Sphere Radiation Calibration System for Satellite Remote Sensors,” *Key Engineering Materials*, vol. 500, pp. 569–573, Jan. 2012, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.500.569>.
- [22] A. Côté, S. Levasseur, S. Boudreau, and J. Genest,