بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

طراحی اپتیکی شبیه‌ساز افق جهت آزمون حسگر افق زمین اسکنینگ دوتایی

پگاه غرقی[۱]، صابر ابرازه[۲]، محمد احسان خضری[۳]

[۱و۲و۳] گروه حسگرهای فضایی، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

pegah.gharghi@gmail.com [1], s.abrazeh@isrc.ac.ir [2], me.khezri@isrc.ac.ir [3]

چکیده - حسگر افق زمین اسکنینگ دوتایی به منظور تعیین زوایای چرخش و پیچش ماهواره مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملکرد این حسگرها براساس آشکارسازی خط جداکننده تابش در لبه زمین است. این شبیه‌ساز قادر به ایجاد افق زمین به منظور تست کالیبراسیون حسگر در محیط آزمایشگاهی می‌باشد. در این مقاله، یک عدسی هلالی به عنوان شبیه‌ساز افق زمین، بر اساس ارتفاع مداری حسگر در فاصله‌ی ۶۰۰۰ کیلومتری طراحی و شبیه‌سازی گردید. بدین منظور از نرم افزار زیمکس برای طراحی عدسی موازی‌ساز و همچنین موقعیت و قطر دیاگرام زمین مطابق با زاویه‌ی ۶۲ درجه میدان دید زمین استفاده شد. نتایج نشان داد که تست کالیبراسیون حسگر در ارتفاع‌های ۶۰۰۰ کیلومتر با به کار بردن عدسی موازی‌ساز از دقت خوبی برخوردار خواهد بود.

کلید واژه- ارتفاع مداری، حسگر افق زمین اسکنینگ دوتایی، شبیه‌ساز افق زمین، عدسی هلالی موازی‌ساز.

Optical Design of Horizon Simulator for Calibration Test of Double Scanning Earth Horizon Sensor

Pegah Gharghi [1], Saber Abrazeh [2], Mohammad Ehsan khezri [3]

[1, 2, 3] Space Sensors Group, Mechanics Institute, Iranian Space Research Center.

pegah.gharghi@gmail.com [1], s.abrazeh@isrc.ac.ir [2], me.khezri@isrc.ac.ir [3]

Abstract- Double scanning earth horizon sensors are used for determining the Roll and Pitch Angles of satellites. These operate on the principal of detecting the discontinuity in the radiance at the limb. In recent Years, with the development of space technology, the earth simulator that can provide horizon earth to calibration tests for earth sensor on the ground. In this paper, we design collimated earth simulator based on the altitude orbit 6000 km by use of meniscus lens. Applied ZEMAX software to design the collimating lens that can provide the position and diameter of earth diaphragms correspond earth angle of 62°. The results show the accuracy of earth simulator for calibration test in 6000 km on the ground.

Keywords: Altitude Orbit, Double Scanning Earth Horizon Sensor, Earth Horizon Simulator, Collimating Meniscus Lens.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-18]

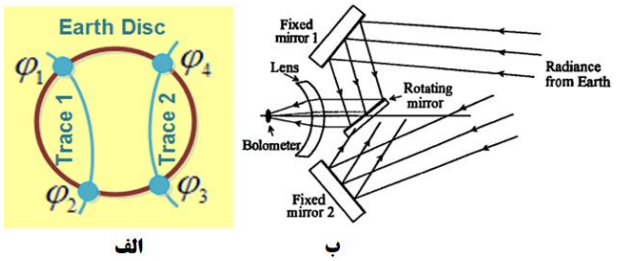
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

حسگر افق زمین مادون قرمز در طیف گسترده‌ای از ماموریت‌های فضایی، جهت تعیین وضعیت فضاپیما و زوایای چرخش و پیچش به کار می‌رود. با توجه به عدم قابلیت انجام آزمون این حسگر در فضا، ارزیابی عملکرد آن با مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی ضروری است. به دلیل محدودیت در فضای آزمایشگاهی، مشکل عدم قرارگیری افق شبیه‌سازی شده در بی‌نهایت با استفاده از یک موازی‌ساز و انتقال افق زمین به بی‌نهایت برطرف می‌شود. بدین منظور از یک یا چند المان اپتیکی [۳-۱] جهت ایجاد افق زمین استفاده می‌گردد. در روش پیشنهادی[۲] استفاده از آینه‌های کروی و یک دیسک سرد، علاوه بر ایجاد افق زمین، کانتراست حرارتی بین زمین و فضا را به وجود می‌آورد. روش دیگر که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد، طراحی شبیه‌ساز افق با استفاده از عدسی موازی‌ساز با قطر زیاد است که با تغییر در دیافراگم زمین، افق زمین را در محیط آزمایشگاهی ایجاد می‌کند. طراحی و شبیه‌سازی عدسی موازی‌ساز به منظور تعیین نقاط گذر از زمین با استفاده از نرم افزار ZEMAX و MATLAB صورت گرفت و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار داده شد.

ساختار کلی حسگر افق زمین اسکنینگ دوتایی

عملکرد حسگر افق زمین بر اساس اختلاف تابش بین زمین و فضای نامتناهی و تعیین خط جداکننده‌ی زمین از فضا به عنوان خط افق است. با توجه به شکل۱-الف، در این حسگرها پرتوهای اپتیکی، دو حلقه از فضا را اسکن و با استفاده از چهار نقطه‌ی گذر از زمین ($\varphi_4,\varphi_3,\varphi_2,\varphi_1$)، زوایای چرخش و پیچش را تعیین می‌کنند[۵,۴]. در شکل۱-ب (نمونه‌ای از حسگر افق زمین اسکنینگ دوتایی) دو آینه‌ی ثابت پرتوهای تابشی از زمین را دریافت می‌کنند. آینه‌ی میانی با دوران حول محور اصلی (محور حسگر تا مرکز زمین) پرتوهای بازتابیده از آینه‌های ثابت را اسکن و به وسیله‌ی یک عدسی کانونی‌کننده به آشکارساز هدایت می‌کند[۵]. در لحظاتی که افق زمین به عنوان پرتوهای دریافتی از زمین، وارد میدان دید حسگر یا از آن خارج می‌گردد، آشکارساز سیگنال مناسب را تولید می‌کند و با پردازش این سیگنال‌ها زوایای وضعیت مختصات بدنی ماهواره نسبت به سیستم مختصات مرجع تعیین می‌شود.



شکل۱: الف: شمای کلی حسگر افق زمین اسکنینگ دوتایی[۵]،
ب: مسیر اسکن شده بر روی زمین و نقاط گذر از آن.

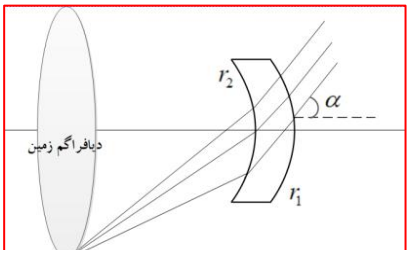
طراحی و مدل‌سازی شبیه‌ساز افق زمین

بر اساس عملکرد شبیه‌ساز افق زمین مادون قرمز، عدسی‌های موازی‌ساز ژرمانیومی به منظور شبیه‌سازی تابش بی‌نهایت از زمین به کار می‌روند. مطابق با شکل ۲ در زمان شروع کار شبیه‌ساز افق زمین، دیافراگم زمین به عنوان صفحه‌ی تصویر با کمترین پراکندگی در گوشه‌ها است، به طوری که حسگر افق قادر به دریافت پرتوهای موازی با هم تحت زاویه‌ی α از شبیه‌ساز افق زمین باشد. α از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد و در آن R شعاع زمین و H ارتفاع مداری است.

$$\alpha = \sin\left(R/H+R\right) \qquad (۱)$$

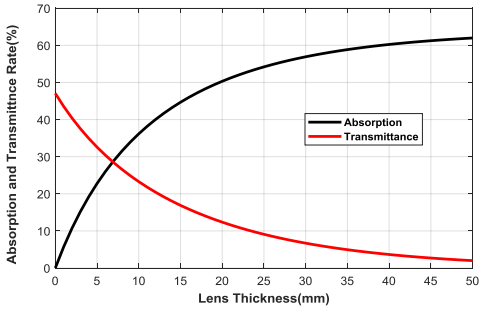
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-18]



شکل ۲: نمایی از عملکرد عدسی موازی‌ساز.

در طراحی موازی‌ساز دو عدسی تخت-کوژ و هلالی مثبت در شرایط یکسان و با فاصله‌ی کانونی برابر مورد بررسی قرار گرفتند. در مقایسه، با توجه به مقدار کمتر ابیراهی در عدسی هلالی مثبت از این نوع عدسی در طراحی استفاده شد. با توجه به ناحیه عملکرد حسگر (۱۴- ۱۶میکرومتر)، در طراحی عدسی طول‌موج مرکزی ۱۵ میکرومتر در نظر گرفته شد که ژرمانیوم در این طول‌موج دارای ضریب شکست ۴/۰۰۱۳۶ است. ضخامت عدسی ژرمانیومی به طول موج و میزان جذب در کریستال بستگی دارد. شکل ۳ افزایش میزان جذب و کاهش عبور در ضخامت‌های مختلفی از کریستال (t) را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه قطر عدسی ۲۵۰mm است و نسبت ضخامت به قطر کمتر از ۰/۱ $(t/D \le 1/10)$ یکی از الزامات طراحی عدسی‌هاست، t=20mm انتخاب شد. در این حالت مطابق با شکل ۳ میزان جذب و عبور به ترتیب ٪۵۰/۳۱ و ٪۱۲/۳۵ به دست آمد.



شکل ۳: نمودار جذب و عبور پرتو در کریستال ژرمانیوم.

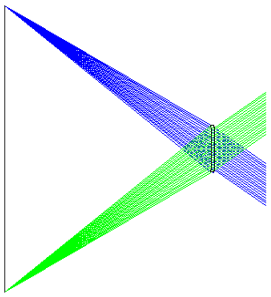
محاسبات تعیین شعاع انحنای دو سطح (r_1 و r_2) و فاصله کانونی (f)، بر اساس زاویه‌ی دید زمین و قطر عدسی موازی‌ساز، در ضخامت ۲۰mm به منظور ایجاد کمترین مقدار ابیراهی صورت گرفت. با توجه به نحوه‌ی عملکرد شبیه‌ساز افق و طراحی عدسی بر اساس میدان دید زمین (2α)، این مقدار برای ارتفاع ۶۰۰۰ کیلومتر با توجه به رابطه‌ی (۱) 62° به دست آمد. با به کار بردن رابطه‌ی (۲) جهت به دست آوردن حداقل ابیراهی عدسی [۶] و همچنین استفاده از رابطه‌ی (۳)، مقادیر r_1 و r_2 و f به ترتیب ۱۶۴۵، ۲۳۰۰ و ۱۸۶۴/۳۲۲ میلیمتر محاسبه شدند.

$$r_2/r_1 \cong 2(n+2)(n-1)/n(n+2) \qquad (۲)$$

$$1/f = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2) + (n-1)^2 t/nr_1r_2 \qquad (۳)$$

شبیه‌سازی و تحلیل نتایج حاصل از محاسبات

در این مرحله با شبیه‌سازی عدسی موازی‌ساز ژرمانیومی به منظور برپایی بستر تست حسگر افق زمین در ارتفاع مداری ۶۰۰۰ کیلومتر، قطر دیافراگم زمین و همچنین موقعیت آن نسبت به عدسی موازی‌ساز به ترتیب ۱۴۲۰ و ۱۱۶۰ میلیمتر تعیین شد. در شکل ۴ نمای کلی از شبیه‌سازی عدسی موازی‌ساز مشاهده می‌شود.



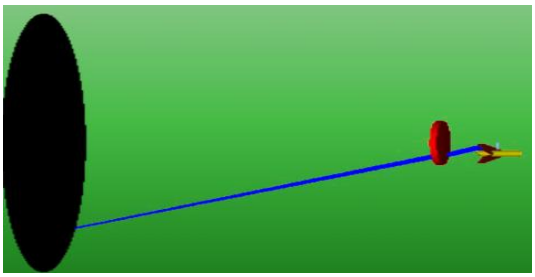
شکل ۴: شمای کلی از شبیه‌سازی عملکرد عدسی موازی‌ساز.

با توجه به اینکه پرتوهای خروجی از موازی‌ساز به عنوان خط افق زمین می‌بایست با زاویه α خارج و اختلاف زاویه‌ی پرتوها با یکدیگر کمتر از ۱ میلی‌رادیان باشد. بیشینه مقدار خطای موازی‌سازی بین پرتوهای خروجی با زاویه‌ی 31^o، مقدار 0.046^o (۰/۸میلی‌رادیان) به دست آمد. در شکل ۵ نمای کلی از حسگر افق زمین، عدسی موازی‌ساز و دیافراگم زمین نشان داده شده است. شکل ۶ نتیجه این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود سه حالت ممکن برای پرتوهای دریافتی از زمین توسط حسگر وجود دارد. حالت اول، پرتوها در مسیر اسکن شده توسط آینه

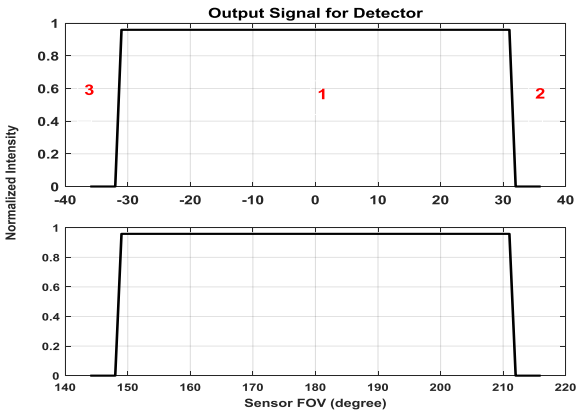
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-18]

میانی قرار بگیرند. حالت دوم متناظر با ناحیه‌ی ۲ و ۳ بیانگر این است که پرتوهای رسیده از زمین در ناحیه‌ی اسکن شده قرار نگرفته و پس از بازتاب از آینه ثابت، به آینه‌ی چرخان برخورد نمی‌کنند. در حالت سوم پرتوهای دریافتی از زمین به آینه‌های ثابت برخورد نمی‌کنند.



شکل ۵: نمای کلی شبیه‌سازی جهت تایید عدسی طراحی شده.



شکل ۶: پالس دریافتی از آشکارساز حسگر افق زمین.

زوایای لبه‌ی زمین طبق شکل۱ و روابط موجود در [۵] مطابق با میدان دید زمین (۶۲^{o}) و در حالتی که پرتوهای افق از بی‌نهایت به حسگر می‌رسند، مقادیر ۳۱± ،۱۴۹ و ۲۱۱ درجه متناظر با مرز جداکننده‌ی بین زمین و فضا محاسبه شدند. با توجه به شکل ۶، در همین زوایا نیز شدت دریافتی از زمین دارای بیشینه مقدار است و این زوایا لبه-ی زمین را تعیین می‌کنند. همخوانی این نتایج موجب تایید المان اپتیکی در نظر گرفته شده و همچنین روش طراحی به عنوان ابزاری برای شبیه‌ساز افق زمین گردید. نتایج به دست آمده از تحقیق صورت گرفته در این مقاله در مقایسه با [۱] گویای این مطلب است که با وجود مشکلات طراحی از جمله ابیراهی بسیار زیاد برای $2\alpha\rangle 30^{\circ}$، این طراحی با در نظر گرفتن ملاحظات اپتیکی، قادر به ایجاد پرتوهای خروجی موازی از عدسی ژرمانیومی برای $2\alpha = 62^{\circ}$ با بیشینه خطای موازی‌سازی ۰/۸میلی-رادیان است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت تست حسگر افق زمین مادون قرمز، ابزاری جهت برپایی بستر تست حسگر افق زمین اسکنینگ دوتایی در ارتفاع مداری ۶۰۰۰ کیلومتر (میدان دید ۶۲^{o}) طراحی و شبیه‌سازی گردید. بدین منظور از یک عدسی هلالی مثبت از جنس ژرمانیوم جهت ایجاد افق زمین استفاده گردید که با شبیه‌سازی آن قطر دیافراگم زمین و موقعیت آن نسبت به عدسی تعیین شد. این طراحی براساس میدان دید زمین (۶۲^{o}) در ارتفاع مداری ۶۰۰۰ کیلومتر صورت گرفت که پرتوهای موازی خروجی از عدسی ژرمانیومی دارای دقت $۰/۰۴۶^{o}$ بودند. پس از تست حسگر با عدسی موازی‌ساز ژرمانیومی، زوایای خط افق ۳۱± ،۱۴۹ و ۲۱۱ درجه به دست آمد که در تطابق خوبی با مقادیر به دست آمده از محاسبات بود.

مرجع‌ها

[1] W. Zhe, Z. Guo, C. Q. Meng, S. X. Yang, G. Y. Jun, "Optical and Mechanical Structure Design of a High Altitude Orbits Collimating Infrared Earth Simulator",SPIE ,vol. 8907, 2013.

[2] V .Alperovich, "Earth-atmosphere-space simulator horizon sensor", SPIE, Vol. 2426/331, 1990.

[3] R. k. Gupa, D. P. Jagannatha, K. Rathinam, V. P. V. Varadarajulu, T. K. Alex, " Large Earth Simulator For Testing Low Altitude IR Earth Sensor", SPIE. Vol. 972, Infrared Technology XIV, 1988.

[4] "Conical Earth Sensor (IPS-6) 12/83," ed. ITHACO Space Products, 1983.

[5] M. J. Sidi, Spacecraft dynamics and control: a practical engineering approach vol. 7: Cambridge university press, 1997.

[6] J. W. Smith, " Modern Optical Engineeing", New York, Mc Graw-Hill, 2008.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-18]