



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



طراحی اپتیکی شبیه‌ساز افق جهت آزمون حسگر افق زمین اسکینینگ دوتایی

پگاه غرقی^۱، صابر ابراهه^۲، محمد احسان خضری^۳

^{۱و۲و۳} گروه حسگرهای فضایی، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران

pegah.gharghi@gmail.com¹, s.abraze@isrc.ac.ir², me.khezri@isrc.ac.ir³

چکیده - حسگر افق زمین اسکینینگ 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 اسکینینگ دوتایی، شبیه‌ساز افق زمین، عدسی هلالی موازی‌ساز.

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

Pegah Gharghi¹, Saber Abraze², Mohammad Ehsan khezri³

^{1, 2, 3} Space Sensors Group, Mechanics Institute, Iranian Space Research Center.

pegah.gharghi@gmail.com¹, s.abraze@isrc.ac.ir², me.khezri@isrc.ac.ir³

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.

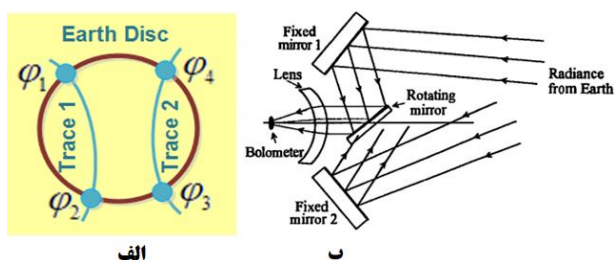
مقدمه

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 [۱-۳] 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 شکل ۱-الف، در این حسگرها پرتوهای اپتیکی، دو حلقه از فضا را اسکن و با استفاده از چهار نقطه‌ی گذر از زمین $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)$ ، زوایای چرخش و پیچش را تعیین می‌کنند [۴، ۵]. در شکل ۱-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.



شکل ۱: 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 شعاع زمین R و ارتفاع مداری است.

$$\alpha = \sin(R/H + R) \quad (1)$$

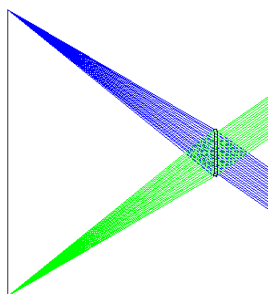
شبیه‌ساز افق و طراحی عدسی بر اساس میدان دید زمین
(2α)، این مقدار برای ارتفاع ۶۰۰۰ کیلومتر با توجه به
رابطه‌ی (۱) 62° به دست آمد. با به کار بردن رابطه‌ی (۲)
جهت به دست آوردن حداقل ابیراهی عدسی [۶] و
همچنین استفاده از رابطه‌ی (۳)، مقادیر r_1 و r_2 و f به
ترتیب ۱۶۴۵ ، ۲۳۰۰ و $۱۸۶۴/۳۲۲$ میلی‌متر محاسبه شدند.

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

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

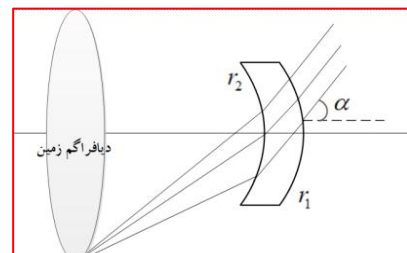
شبیه‌سازی و تحلیل نتایج حاصل از محاسبات

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.



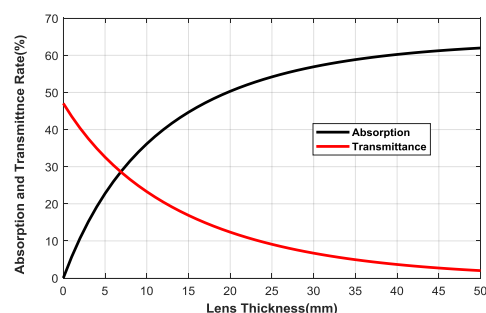
شکل ۴: نمای کلی از شبیه‌سازی عملکرد عدسی موازی‌ساز.

با توجه به اینکه پرتوهای خروجی از موازی‌ساز به عنوان
خط افق زمین می‌بایست با زاویه α خارج و اختلاف زاویه-
ی پرتوها با یکدیگر کمتر از ۱ میلی‌رادیان باشد. بیشینه
مقدار خطای موازی‌سازی بین پرتوهای خروجی با زاویه‌ی
 31° ، مقدار 0.46° (۰/۸ میلی‌رادیان) 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



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 ($14^\circ - 16^\circ$ میکرومتر)،
در طراحی عدسی طول‌موج مرکزی ۱۵ میکرومتر در نظر
گرفته شد که ژرمانیوم در این طول‌موج دارای ضریب
شکست $4/0.136$ 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 $(t/D \leq 1/10) \cdot 0.1$ یکی از الزامات طراحی عدسی‌هاست،
 $t=20\text{mm}$ انتخاب شد. در این حالت مطابق با شکل ۳
میزان جذب و عبور به ترتیب $50/31\%$ و $12/35\%$ 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

$30^\circ < 2\alpha$ ، 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 موازی سازی 0.8 میلی-رادیان است.

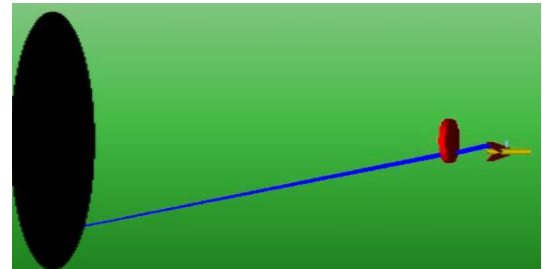
نتیجه گیری

با توجه به اهمیت تست حسگر افق زمین مادون قرمز، ابزاری جهت برپایی بستر تست حسگر افق زمین اسکینینگ دوتایی در ارتفاع مداری 6000 کیلومتر (میدان دید 62°) طراحی و شبیه سازی گردید. بدین منظور از یک عدسی هلالی مثبت از جنس ژرمانیوم جهت ایجاد افق زمین استفاده گردید که با شبیه سازی آن قطر دیافراگم زمین و موقعیت آن نسبت به عدسی تعیین شد. این طراحی براساس میدان دید زمین (62°) در ارتفاع مداری 6000 کیلومتر صورت گرفت که پرتوهای موازی خروجی از عدسی ژرمانیومی دارای دقت 0.46° بودند. پس از تست حسگر با عدسی موازی ساز ژرمانیومی، زوایای خط افق 31 ± 149 و 211 درجه به دست آمد که در تطابق خوبی با مقادیر به دست آمده از محاسبات بود.

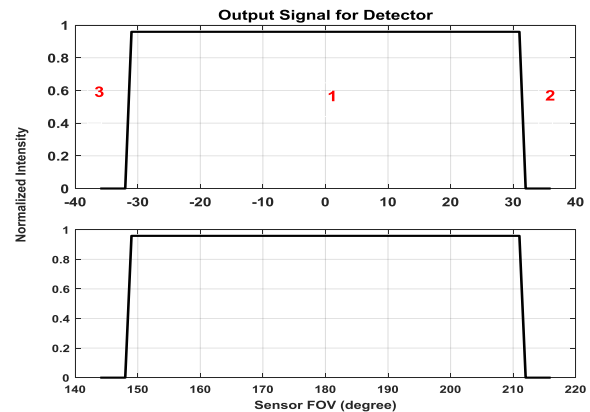
مرجع ها

- [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 Engineering", New York, Mc Graw-Hill, 2008.

میانی قرار بگیرند. حالت دوم متناظر با ناحیه ۲ و ۳ بیانگر این است که پرتوهای رسیده از زمین در ناحیه اسکن شده قرار نگرفته و پس از بازتاب از آینه ثابت، به آینه ی چرخان برخورد نمی کنند. در حالت سوم پرتوهای دریافتی از زمین به آینه های ثابت برخورد نمی کنند.



شکل ۵: نمای کلی شبیه سازی جهت تایید عدسی طراحی شده.



شکل ۶: پالس دریافتی از آشکارساز حسگر افق زمین.

زوایای لبه ی زمین طبق شکل ۱ و روابط موجود در [۵] مطابق با میدان دید زمین (62°) و در حالتی که پرتوهای افق از بی نهایت به حسگر می رسند، مقادیر 31 ± 149 و 211 درجه متناظر با مرز جداکننده ی 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 می کنند. همخوانی این نتایج موجب تایید امان اپتیکی در نظر گرفته شده و همچنین روش طراحی به عنوان ابزاری برای شبیه ساز 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