



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 1, pp.: 147-152  
2022

DOI:  
10.22034/JSSTA.2022.327709.1062

### Article Info

Received: 2022-2-2  
Accepted: 2022-6-8

### Keywords

Sun sensor, Optical  
Simulation, Diffraction  
pattern

### How to Cite this article

Marzieh Afkhami, Simin Alibani, Housein Forouzan, Mohammad ali Asnafi,  
Design and Manufacture of Digital Sun Sensor with an Optimized Slit over the Entire Field of View  
*Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 2 (1), p.: 147-152, 2022.

## Design and Manufacture of Digital Sun Sensor with an Optimized Slit over the Entire Field of View

Marzieh Afkhami <sup>1\*</sup>, Simin Alibani<sup>2</sup>  
Housein Forouzan <sup>3</sup>, Mohammad ali Asnafi<sup>4</sup>

- 1, \*. Space Sensor Group, Institute of Mechanics, ISRC, marziafkhami@gmail.com, Corresponding author
2. Space Sensor Group, Institute of Mechanics, ISRC, alibani.simin@gmail.com
3. Space Sensor Group, Institute of Mechanics, ISRC, h.forouzan@isrc.ac.ir
4. Space Sensor Group, Institute of Mechanics, ISRC, rossanelski2009@yahoo.com

### Abstract

One of the key subsystems in satellites is the attitude determination, and the sun sensor is one of the most common sensors in this field. Today, due to the increasing development of satellites, the need to increase the accuracy of satellite subsystems seems very necessary. In this paper, the design of a sun sensor made with an optimized slit in the entire field of view is examined. In this sensor, two orthogonal linear detectors are used, on top of each of the detectors, an optimal gap perpendicular to the detectors is required at an optimal distance according to the field of view. Due to the light passing through the optimized slits and its effect on the detectors and the slit, a peak can be seen in the output of the detectors, which according to the location of the peak, the angle of the incoming light can be calculated with high accuracy. The sun sensor made in Shiraz Mechanics Research Institute has an absolute error (2 sigma) of 0.14 in the 50 degrees of field of view



# طراحی و ساخت حسگر خورشیدی دیجیتال با شکاف بهینه شده در کل میدان دید

مرضیه افخمی<sup>۱\*</sup>، سیمین علیبانی<sup>۲</sup>، حسین فروزان<sup>۳</sup>، محمد علی اصنافی<sup>۴</sup>

- ۱.\* گروه پژوهشی حسگرهای فضایی، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران marziafkhani@gmail.com (نویسنده مسئول)
۲. گروه پژوهشی حسگرهای فضایی، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران، alibani.simin@gmail.com
۳. گروه پژوهشی حسگرهای فضایی، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران h.forouzan@isrc.ac.ir
۴. گروه پژوهشی حسگرهای فضایی، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران، rossanelski2009@yahoo.com

دسترس پذیر در نشانی:  
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۱، صفحه ۱۵۲-۱۴۷  
بهار و تابستان ۱۴۰۱

DOI:  
10.22034/JSSTA.2022.327709.1062

## چکیده

یکی از زیرسیستم‌های کلیدی در ماهواره‌ها، سیستم تعیین وضعیت است و حسگر خورشید یکی از رایج‌ترین حسگرهای در این حوزه به شمار می‌آید. امروزه با توجه به پیشرفت روزافزون ماهواره‌ها، نیاز به افزایش دقت در زیرسیستم‌های ماهواره بسیار ضروری است. از این‌رو، در این مقاله، طراحی اپتیکی یک شکاف بهینه در حسگر خورشید با هدف افزایش دقت حسگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حسگر، از دو عدد آشکارساز خطی متعامد استفاده شده است که بالای هر یک از آشکارسازها شکاف بهینه‌ای عمود بر آشکارسازها در فاصله بهینه‌ای با توجه به میدان دید مورد نیاز، قرار گرفته است. با توجه به نور عبوری از شکاف‌های بهینه و اثر آن بر آشکارسازها و شکاف، قله‌ای در خروجی آشکارسازها قابل مشاهده است که با توجه به مکان قله و شکل آن می‌توان زاویه نور ورودی را با دقت بالایی محاسبه کرد. حسگر خورشید ساخته شده در پژوهشکده مکانیک شیراز دارای خطای مطلق (۲ سیگما) ۰.۱۴ در زاویه دید  $\pm 50^\circ$  درجه است.

## تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

## واژه‌های کلیدی

حسگر خورشید، شبیه‌سازی اپتیکی،  
الگوی پراش

## نحوه استناد به این مقاله

مرضیه افخمی، سیمین علیبانی، حسین فروزان، محمد علی اصنافی، "طراحی و ساخت حسگر خورشیدی دیجیتال با شکاف بهینه شده در کل میدان دید"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد دوم، شماره اول، صفحات ۱۴۷-۱۵۳، ۱۴۰۱.

## ۱- مقدمه



شکل ۱. حسگر خورشید پژوهشکده مکانیک

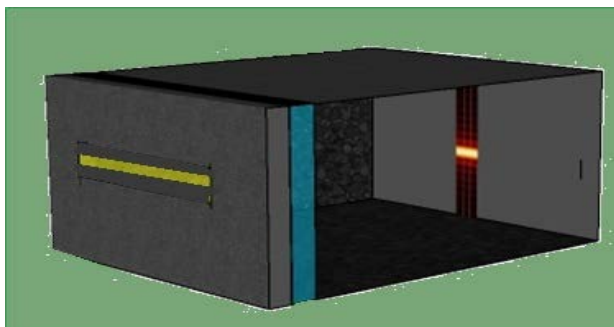
با توجه به اهمیت سیستم تعیین وضعیت ماهواره و جایگاه ویژه حسگر خورشید به عنوان یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین حسگرها در این سیستم، ارتقای این حسگر از لحاظ دقت به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترها بسیار حائز اهمیت است [۱].

در سال‌های اخیر، حسگرهای خورشیدی دیجیتال با دقت کمتر از ۰.۵ درجه ساخته شده‌اند که قابلیت نصب بر روی ماهواره‌های کوچک مانند انواع میکروماهواره‌ها و ماهواره‌های مکعبی را دارند. ساختار طراحی برخی از مهم‌ترین نوع از این حسگرها، بر مبنای استفاده از شکاف‌های اپتیکی و آشکارسازهای خطی است [۳،۲]. نمونه‌هایی از این حسگرها، حسگر SS411 تولید شده توسط شرکت سینکلیر<sup>۱</sup> است که دارای دقت ۰.۱۶ درجه (2σ) است [۴]؛ هم‌چنین، حسگر تک شکاف دانشگاه یورک<sup>۲</sup> با دقت ۰.۳۲ درجه (RMS) که دارای زاویه دید  $\pm 53^\circ$  است [۵]، از دیگر نمونه‌های این نوع حسگرهاست. طراحی بهینه شکاف اپتیکی در بهتر کردن دقت حسگر تاثیر به‌سزایی دارد. در این مقاله طراحی اپتیکی حسگر با شکاف مستطیل شکل توضیح داده می‌شود. با طراحی بهینه شکاف، ساخت حسگری با دقت ۰.۱۴ درجه (2σ) و ۰.۰۸ درجه (RMS) امکان‌پذیر است. به منظور یافتن زاویه تابشی پرتوی خورشید به صفحه حسگر، از خروجی‌های آشکارساز خطی استفاده می‌شود. خروجی آشکارساز، رشته حاوی شدت نور پیکسل‌های آشکارساز است که شدت هر پیکسل متناسب با وضعیت پرتوی نوری تابیده شده به آن، دارای مقدار مشخصی است. با توجه به پهنای شکافی که پرتوی نور از آن عبور کرده و به صفحه آشکارساز می‌رسد، بردار شدت نور پیکسل‌ها بر حسب شماره هر پیکسل مشخص می‌شود. در این مقاله به منظور محاسبه پهنای بهینه شکاف، نور عبوری از شکاف در نقاط مختلف میدان دید شبیه‌سازی می‌شود. با تنظیم مناسب پهنای شکاف می‌توان به یک خروجی تک قله دست یافت که منجر به افزایش دقت حسگر در مقایسه با حسگرهای مشابه می‌شود.

یک طراحی اپتیکی جامع از حسگر خورشید نیازمند در نظر گرفتن الگوی پراش در صفحه آشکارساز است. بدین منظور، الگوی پراش شبیه‌سازی شده است. در ادامه، ابتدا ساختار هندسی حسگر خورشید و سپس طراحی اپتیکی حسگر خورشید به منظور بهینه‌سازی پهنای شکاف برای دستیابی به دقت ۰.۱۴ درجه (2σ) توضیح داده می‌شود.

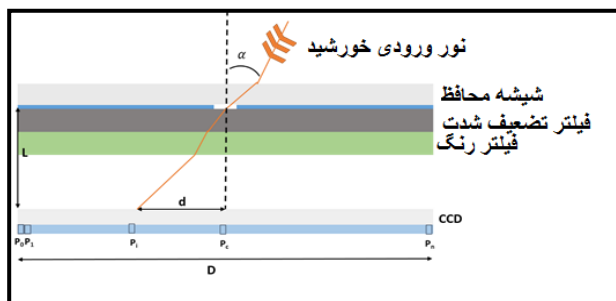
## ۲- ساختار هندسی حسگر خورشید

در حسگر خورشید ساخته شده، از دو آشکارساز متعامد و مجزا استفاده شده است که با توجه به تشابه آشکارسازها، طراحی یک کانال برای بررسی و ساخت حسگر اکتفا می‌کند. در نتیجه این نمونه حسگر را می‌توان حسگر دو کانالی خطی نامید. هر دو کانال حسگر کاملاً مشابه هستند و در نتیجه در طراحی سامانه تنها نیاز است که یکی از کانال‌ها طراحی شود. در چنین حسگری، نور از دهانه شکاف وارد سیستم شده و ایجاد باریکه نوری می‌کند. باریکه نوری ایجاد شده پس از عبور از فیلتر تضعیف شدت و فیلتر رنگ به آشکارساز نوری می‌رسد. مکان لکه نوری تشکیل شده بر روی آشکارساز با استفاده از المان‌های الکترونیکی ترجمه و سپس در بخش پردازش با یک الگوریتم پردازشی مناسب پردازش و مرکزابی می‌شود. با کمک این داده‌ها وضعیت خورشید با کمک دو زاویه آلفا و بتا تعیین می‌شود. شمای چنین حسگر خورشیدی در شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل، زاویه آلفا نشان داده شده



شکل ۳. برای تعیین زاویه بتای خورشید از شکاف و آشکارسازی عمود بر حالت آلفا استفاده می‌شود

در طراحی هندسی حسگر و در راستای کنترل تشعشعات مخرب فضایی و مقاومیت در برابر آن‌ها، ابتدا شکاف که پایین شیشه محافظ از جنس سفایر<sup>۱</sup> لایه نشانی شده است، قرار گرفته و بعد از آن فیلترها جایگذاری می‌شوند. شیشه سفایر با توجه به مقاومیت فیزیکی بسیار بالا و امکان حفاظت حسگر در برابر تشعشعات فضایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



شکل ۴. شماتیک طراحی هندسی حسگر خورشیدی طراحی شده

### ۳- طراحی اپتیکی حسگر خورشید

در طراحی پهنای شکاف، انجام محاسبات تنها با کمک اپتیک هندسی کافی نبوده و لازم است که بررسی‌های دقیق‌تر با در نظر گرفتن اپتیک موجی و مساله پراش صورت پذیرد. در طراحی اپتیکی حسگر خورشید، به‌دست آوردن الگوی پراش در تمام نقاط صفحه تصویر و پیش‌بینی اینکه تصویر پراش چگونه با پارامترهای

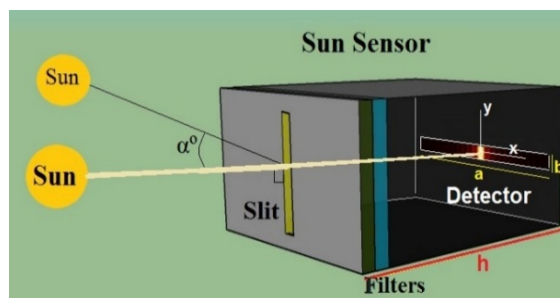
است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، میدان دید حسگر در واقع محدوده‌ای از زوایای خورشیدی که توسط حسگر دیده می‌شود را مشخص می‌کند [۳]. میدان دید در جهت محور  $x$  بر طبق معادله زیر تعیین می‌شود:

$$FOV = 2 \arctan\left(\frac{a}{2h}\right) \quad (1)$$

که در آن  $a$  طول آشکارساز و  $h$  فاصله بین آشکارساز تا شکاف است. بر طبق معادله ۱، فاصله بین آشکارساز تا شکاف،  $h$  مقدار زاویه دید حسگر را تعیین می‌کند. با آنالیز مکان الگوی پراش خورشید در صفحه آشکارساز، زاویه خورشید با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x_i}{h}\right) \quad (2)$$

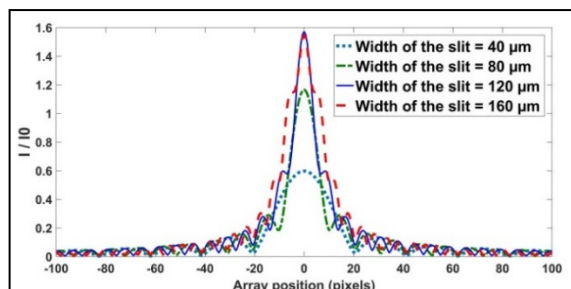
که در آن  $x_i$  زاویه مختصات مربوط به مرکز الگوی پراش خورشید است.



شکل ۲. ساختار کلی حسگر خورشید شامل شکاف اپتیکی، فیلتر رنگ و تضعیف شدت و آشکارساز نوری برای تعیین زاویه آلفای خورشید

زاویه بتا توسط شکافی عمود نسبت به این شکاف و آشکارسازی عمود نسبت به آشکارساز زاویه آلفا تعیین می‌شود (شکل ۳).

شدت بسیار کاهش می‌یابد و اگر پهنای شکاف بیش از مقدار بهینه باشد، رزولوشن کاهش می‌یابد. بنابراین، اولین کار در طراحی اپتیکی حسگر خورشید تعیین پهنای شکاف بهینه است. بر مبنای معادله ۳، توزیع الگوی پراش نور با پهنای شکاف‌های متفاوت با استفاده از شبیه‌سازی متلب به دست می‌آید. انتشار نور درون حسگر تنها با یک طول موج در نظر گرفته شده است. طول موج نور فرودی بر مبنای طول موج حساسیت آشکارساز تعیین می‌شود. این انتخاب در واقع معادل قرار دادن یک فیلتر عبوری پس از شکاف است. پیک حساسیت آشکارساز مورد استفاده در طول موج ۵۵۰ نانومتر است، زمانی که پرتو فرودی عمود بر شکاف است. شکل ۵، پهنای مرکزی الگوی پراش را روی صفحه آشکارساز با ابعاد پیکسل ۸ میکرومتر به ازای پهنای مختلف شکاف نشان می‌دهد. بر مبنای نتایج شبیه‌سازی با افزایش پهنای شکاف، پهنای نمودار پراش در ابتدا افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش کنتراست الگوی پراش است. پس از رسیدن به یک میزان مشخص از شدت الگوی پراش، شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۵. الگوی پراش با پهنای شکاف‌های متفاوت در  $h = 8 \text{ mm}$

بر مبنای نتایج شبیه‌سازی که در شکل ۵ نشان داده شده است، وقتی پهنای شکاف ۸۰ میکرومتر باشد، الگوی پراش در بهترین وضعیت خود است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با قراردادن پهنای شکاف در ۸۰ میکرومتر، تنها یک پیک شدت در صفحه آشکارساز خواهیم داشت. انتظار می‌رود که با حضور یک پیک تنها (در حالی که شدت در لب‌های کناری بسیار کمتر از لب اصلی است)، دقت حسگر به شدت افزایش یابد.

آزمایشگاهی مانند فاصله شکاف تا صفحه آشکارساز یا ابعاد روزنه تغییر می‌کند، بسیار ضروری است. پراش از یک تک شکاف به دو دسته پراش فرنل<sup>۱</sup> و پراش فرانیهوفر<sup>۲</sup> تقسیم می‌شود. در پراش فرنل، پرتو فرودی روی شکاف یا پرتو پراکنده شده از روی شکاف یا هر دوی آنها نور تخت نیست. به دلیل فاصله متناهی بین شکاف و آشکارساز آرایه خطی، پراش فرنل برای توصیف پراش در حسگر خورشید مناسب است. محاسبه پراش به طور کلی به صورت عددی انجام می‌گیرد که شامل دو انتگرال با یک تابع پیچیده با یک آرگومان با نوسان سریع است. در این حالت، جواب معمولاً توسط انتگرال‌های پراش معروف به فرنل-کیرشهوف<sup>۳</sup> یا ریلی-سامرفیلد<sup>۴</sup> به دست می‌آید [۶، ۷]. در این مقاله، مساله پراش یک تک شکاف بر مبنای پراش فرنیلیز یک شکاف مستطیل شکل با استفاده از نرم‌افزار متلب<sup>۵</sup> شبیه‌سازی شد.

برای رسیدن به حالت بهینه حسگر خورشید الگوی پراش روی صفحه آشکارساز (در یک جهت)، برای زوایای فرودی متفاوت خورشید، بر مبنای تئوری پراش فرنل تحلیل و بررسی می‌شود. به دلیل فاصله زیاد بین حسگر و خورشید می‌توان نور رسیده از خورشید را به صورت موج تخت در نظر گرفت. بر اساس فرمول فرنل-کیرشهوف، توزیع شدت پراش روی صفحه آشکارساز بر طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

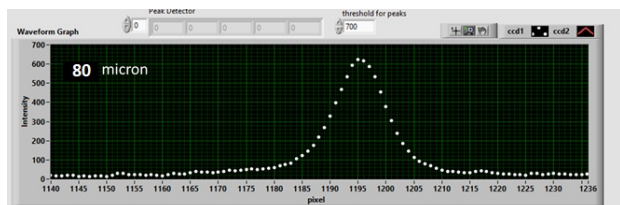
$$\vec{E}(P) = \frac{A}{i\lambda} \iint_{slit} \frac{e^{ik[x_0 \cos(\alpha) + y_0 \cos(\beta) + r]}}{h} d\sigma \quad (3)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج،  $A$  ثابتی است که شدت میدان الکتریکی پرتو خورشید فرودی را نشان می‌دهد،  $k$  بردار موج است،  $h$  فاصله بین آشکارساز تا شکاف و  $\alpha$  و  $\beta$  دو زاوی کسینوسی فرودی حسگر خورشید را نشان می‌دهد.

برای اینکه بهترین الگوی پراش نور روی آشکارساز به دست آید، پهنای شکاف باید بهینه شود. اگر شکاف خیلی باریک باشد،

4 Rayleigh-Sommerfeld Diffraction  
5 MATLAB

1 Fresnel Diffraction  
2 Fraunhofer Diffraction  
3 Fresnel- Kirchhoff Integral



شکل ۸. سیگنال خروجی روی آشکارساز به ازای پهنای شکاف ۸۰ میکرومتر

#### ۴- نتیجه گیری

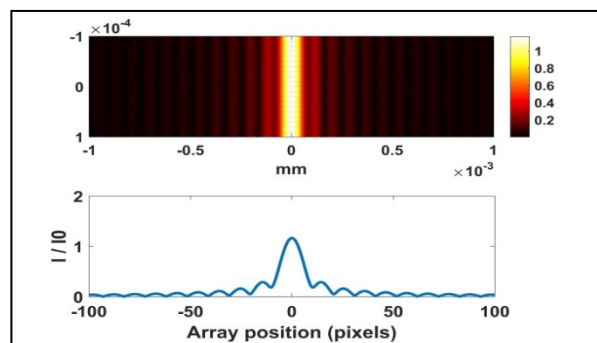
طراحی بهینه شکاف اپتیکی، در بهتر کردن دقت حسگر تاثیر به سزایی دارد. در این مقاله، چگونگی طراحی اپتیکی در حسگر خورشیدی دیجیتال، توضیح داده شد. بر مبنای نتایج شبیه سازی، وقتی پهنای شکاف ۸۰ میکرومتر باشد، الگوی پراش در بهترین وضعیت خود است و امکان ساخت حسگری با دقت بالا ممکن خواهد بود.

#### تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

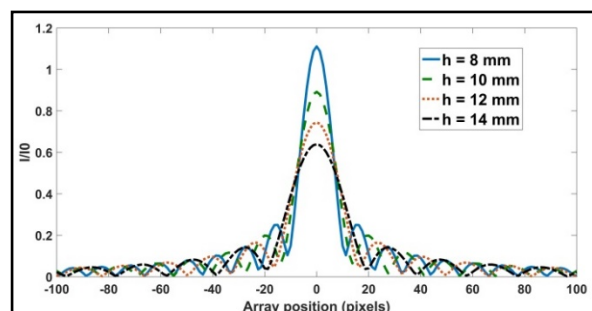
#### مراجع

- [1] M. Pedersen, and J.H. Hales, Linear Two-axis MOEMS sun sensor, Citeseer, 2006.
- [2] S. Rhee, Fine Digital Sun Sensor (FDSS) Design and Analysis for STSat-2. in International Conference on Control, Automation and Systems. 2005.
- [3] F. Qiao-yun, P. Jia-wen, and G. Xinyang, *Micro digital sun sensor with linear detector*, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 87, 075003, 2016.
- [4] J. Enrigh, D. Sinclair, C. Li, *Embedded algorithms for the SS-411 digital sun sensor*, Acta Astronautica 64 - 906 تا 924, 2009
- [5] F. Diriker, A. Frias, K. Keum and R. S. K. Lee, *Improved Accuracy of a Single-Slit Digital Sun Sensor Design for CubeSat Application Using Sub-Pixel Interpolation*, Sensors, 21, 1472, 2021



شکل ۶. توزیع تابندگی یا شدت پراش روی آشکارساز با شکاف هایی با پهنای ۸۰ میکرومتر

شبیه سازی عددی بر مبنای معادله ۳ به کار گرفته می شود تا الگوی پراش با فواصل مختلف آشکارساز تا شکاف نیز بررسی شود. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش این فاصله اندازه الگوی پراش افزایش می یابد و دقت حسگر کاهش می یابد.



شکل ۷. الگوی پراش با پهنای شکاف ۸۰ میکرومتر در فواصل متفاوت آشکارساز تا شکاف

شکل ۸، سیگنال واقعی خروجی روی آشکارساز به ازای پهنای شکاف ۸۰ میکرومتر را در تست عملکردی حسگر نشان می دهد. تست عملکردی شامل تشخیص پیکسل های روشن و شدت آن ها روی آشکارساز، استخراج قله نوری و تبدیل شماره پیکسل ها به زاویه با توجه به توابع کالیبراسیون است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، با قراردادن پهنای شکاف در ۸۰ میکرومتر تنها یک پیک شدت در صفحه آشکارساز وجود خواهد داشت. حضور یک پیک تنها، دقت حسگر را به شدت افزایش می دهد زیرا با توجه به پیدا کردن مکان دقیق قله می توان زاویه نور ورودی را با دقت بالایی محاسبه کرد.

- [6] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference And Diffraction of Light* (Cambridge University, 1999).
- [7] P. G. Rudolf, J.J. Tollett, M. McGowan. *Computer modeling of wave propagation with a variation of the Helmholtz–Kirchhoff relation*. *Appl Opt*;29:998, 1990.



#### COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)