

高温目标偏振特性数值仿真研究

相云峰

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年4月21日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年5月24日

摘要

随着人类对宇宙的探索逐渐加深, 飞行器更频繁往返于太空与地球之间, 再穿过大气层时温度会迅速升高, 对传统的光强探测技术造成困扰。为克服该问题, 本文结合菲涅尔方程以及热光系数对高温目标的自发辐射偏振特性进行了初步的理论分析和建模仿真, 并研究了在特定参数高温目标的自发辐射偏振规律。研究表明: 高温目标自发辐射发射率平行分量和垂直分量随发射角和温度的变化趋势不一致, 但是偏振度随温度(发射角为 0° 时除外)的升高和发射角增大整体呈现上升趋势。

关键词

高温目标, 发射角, 温度, 偏振特性

Numerical Simulation Study of Polarization Characteristics of High-Temperature Targets

Yunfeng Xiang

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 21st, 2024; accepted: May 17th, 2024; published: May 24th, 2024

Abstract

With the gradual deepening of human exploration of the universe, aircraft travels between space and the earth more frequently, and the temperature will rise rapidly when passing through the atmosphere, which has caused problems for traditional light intensity detection technology. In order to overcome this problem, this paper combines Fresnel equation and thermo-optical coefficient to carry out a preliminary theoretical analysis and modeling simulation of the spontaneous radiative polarization characteristics of high-temperature targets, and studies the spontaneous radiative polarization laws of high-temperature targets with specific parameters. The results show that the parallel and vertical components of the spontaneous emission emissivity of high-temperature targets have different trends with the emission angle and temperature, but the degree of polariza-

tion increases with the increase of temperature (except when the emission angle is 0°) and the emission angle increases.

Keywords

High Temperature Target, Launch Angle, Temperature, Polarization Characteristics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着载人航天技术的不断发展,人类越来越频繁地往来于外太空和地球之间,所以对飞船返回舱空间位置精准探测的研究至关重要。飞船返回舱的外壳主要由耐高温的隔热材料组成,当返回舱经过大气层时,返回舱外壳与大气分子发生撞击,表面温度和粗糙度等物理特征发生改变。但是传统的光强探测受雾霾、大气能见度、目标周围的气流扰动等的影响严重,对目标的探测和识别带来很大影响。因此,为了实现目标的“看得远”、“辨得清”、“全天候”需使用偏振探测技术。

1965年, Oscar Sandus 在他的文章中通过理论推导提出了理想光滑的金属表面的热红外偏振特性模型[1]。1994年, D. L. Jordan 和 G. Lewis 以实验的方式研究不同粗糙度的玻璃及铝板表面在 $10.6 \mu\text{m}$ 波段热红外偏振特性[2]。1998年, Wolff 等人测量了相同粗糙度的铝板和玻璃板在不同几何观测条件下的偏振度。在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段,得到了显著的红外偏振差异。结合经验数据,他们提出一种用于解释粗糙和光滑表面的热辐射偏振的综合模型,该模型可以显著增强对红外偏振图像的理解。值得注意的是,在满足一定条件下,该模型可以区分出介电材料中的金属[3]。2000年,荷兰对森林背景下的地雷开展偏振探测实验研究,得出了中波红外偏振成像效果好于可见光成像效果的结论[4]。2005年,瑞典国防研究局进行了装甲车偏振识别实验,完成了对三维目标模型计算仿真[5]。2006年, J. Scott Tyo 等人采用长波红外偏振探测方式开展了在暗弱的背景下的目标识别实验,实验结果表明红外偏振成像能够有效地增强阴影区中目标和背景的对比度[6]。2011年美国空军实验室 AFRL (Air Force Research Laboratory)在 Dayton 的 Wingmasters 靶场展开对空偏振成像目标跟踪实验。该实验在不同背景(草地、树林、跑道和天空)下,对两种不同材质的小型遥控模型飞机进行了长波红外偏振成像,相比于真彩色成像和长波红外成像,其识别效果有明显的提升[7]。2022年,李岩松等人搭建了一种能够做到单/双偏振片观测模式的中波红外偏振探测系统,该系统根据不同的太阳耀光场景需要选择不同的工作模式对目标进行有效探测[8]。2023年,朱德燕等人通过理论验证的方式探索海面空中目标的红外偏振探测最佳波段,并开展了实验验证。实验结果表明:目标和背景的偏振特性在各个波段内变化明显,最终确定在 $8.56\sim 10.08 \mu\text{m}$ 为最佳探测波段[9]。同年,蔡伟等人对多涂层金属目标的表面红外辐射偏振特性开展研究,在 P-G 模型的基础上推导出含有环境热辐射的多涂层目标红外辐射偏振模型[10]。

目前对长波红外自发辐射偏振特性研究主要集中在目标本身处于低温或常温状态,然而对处于高温状态目标的偏振特性的研究较少,且温度对自身自发辐射偏振特性影响的理论建模研究几乎处于空白,亟需展开相关研究,为空间目标的探测与识别提供理论和技术支持。

本文使用了数值分析的方法分析了给定参数的高温目标自发辐射偏振特性。根据菲涅尔理论和热光系数,分析了目标在不同温度和发射角条件下的自发辐射偏振特性。

2. 高温目标红外自发辐射偏振理论模型与数学公式

2.1. 温度恒定的理想光滑表面红外自发辐射偏振模型

所有的物体都会不断地向外辐射红外波段的光波，光波是电磁波的一种，其通过不同介质的分界面时会产生反射和折射现象，如图 1 所示。

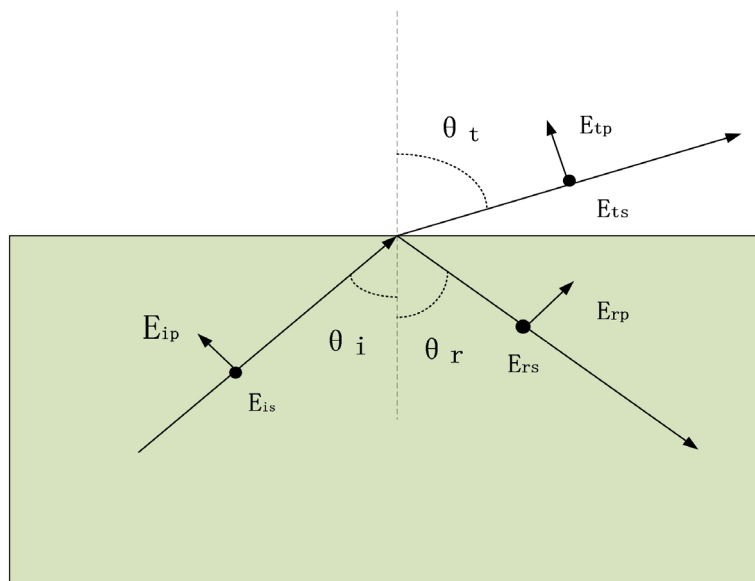


Figure 1. Schematic diagram of infrared spontaneous radiation vector
图 1. 红外自发辐射矢量示意图

由反射定律可知，反射角和入射角大小相等。如果介质表面时可透射的，根据斯涅尔定律，光会在界面处发生折射现象。其折射角由(2-1)给出。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2-1)$$

上式中： n_1 和 n_2 为相邻两介质的折射率， θ_1 为入射光和法线的夹角， θ_2 为折射光和法线的夹角。

反射波和透射波的大小也是两种介质折射率的函数。相对于反射和透射光的入射平面，光场矢量可以分解为垂直或平行于入射平面的电场分量，成为 s 光波和 p 光波[11]。在介质表面 s 波和 p 波的方向发生改变，根据菲涅尔公式，s 和 p 分量的透射系数可以表示为：

$$t_s = \frac{E_s^t}{E_s^i} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2-2)$$

$$t_p = \frac{E_p^t}{E_p^i} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (2-3)$$

所以自发辐射归一化透射率为：

$$T_s = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} t_s^2 = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \left(\frac{E_s^t}{E_s^i} \right)^2 \quad (2-4)$$

$$T_p = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} t_p^2 = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \left(\frac{E_p^t}{E_p^i} \right)^2 \quad (2-5)$$

根据菲涅尔定律和斯涅尔定律，我们分析了恒定温度的光滑表面透射模型。物体自发辐射光光矢量

中平行分量的能量为 $\|E_p\|^2$ ，垂直分量的能量为 $\|E_s\|^2$ ，则 p、s 分量经过折射后各自的能量为 $\tau_p(\varphi, \eta)\|E_p\|^2$ ， $\tau_s(\varphi, \eta)\|E_s\|^2$ ， φ 折射光光矢量的出射方向与表面法向量的夹角， $\eta = n + ik$ 为金属等材料的复折射率，当 $k = 0$ 时，即 $\eta = n$ ，表示玻璃等材料的折射率，因此，可以得到：

$$\tau_s = \frac{4 \cos \varphi \delta}{\delta^2 + \cos^2 \varphi + 2 \delta \cos \varphi} \quad (2-6)$$

$$\tau_p = \frac{\eta^2 \delta^2 + \eta^2 \cos^2 \varphi + 2 \eta^2 \delta \cos \varphi}{\delta^2 + \eta^4 \cos^2 \varphi + 2 \eta^2 \delta \cos \varphi} \tau_s \quad (2-7)$$

其中：

$$\delta = \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \varphi} \quad (2-8)$$

在红外波段，周围环境的辐射对升温的高温目标长波红外自发辐射的影响基本忽略，其偏振特性可视为由目标的自发辐射引起。目标内部产生的自发辐射光可分为内部和外部两个部分考虑，内部的能量全部被吸收，使目标温度不断上升。辐射出外部的光是偏振特性的主要产生部分。因此，我们可以得到下式：

$$\begin{cases} \varepsilon_p(\varphi, \eta) = \tau_p(\varphi, \eta) \\ \varepsilon_s(\varphi, \eta) = \tau_s(\varphi, \eta) \end{cases} \quad (2-9)$$

红外自发辐射光可以分为平行于折射面的 p 分量和垂直于折射面的 s 分量。因为 p 分量和 s 分量对应的 $\varepsilon_p(\varphi, \eta)$ 和 $\varepsilon_s(\varphi, \eta)$ 有差异，从而引起光的偏振特性。所以红外辐射偏振度可以表示为：

$$DOP = \frac{|\varepsilon_p(\varphi, \eta) - \varepsilon_s(\varphi, \eta)|}{\varepsilon_p(\varphi, \eta) + \varepsilon_s(\varphi, \eta)} \quad (2-10)$$

将式(2-6)、式(2-7)和式(2-9)带入(2-10)得到：

$$DOP = \frac{|\tau_p(\varphi, \eta) - \tau_s(\varphi, \eta)|}{\tau_p(\varphi, \eta) + \tau_s(\varphi, \eta)} \quad (2-11)$$

式(2-11)的值即为目标温度恒定的理想光滑表面红外自发辐射偏振度。

2.2. 理想光滑表面高温目标自发辐射偏振模型

由上述章节可知，目标的自发辐射偏振特性是由无偏振度的，热辐射在介质表面处因折射率不同而造成平行分量的相对强度和垂直分量的相对强度有所差异进而影响目标的偏振度。对于高温目标而言，温度对目标自发辐射光强度的影响并不会对偏振度产生影响，仅仅是自发辐射产生的原因。然而，温度对目标相对折射率的改变才是自发辐射偏振度改变的根本原因。因此，这里引入热光系数这一概念。

热光系数[12] [13]，即折射率温度系数，指的是光学材料的折射率随温度的变化率，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，这里用 σ 表示，即

$$\sigma = \frac{d\eta}{dT} \quad (2-12)$$

由于材料的相对折射率会随着温度变化，不同材料的热光系数(折射率温度系数)也不一样。当 $\sigma < 0$ 时，材料的相对折射率会随着温度的升高而减小；反之，当 $\sigma > 0$ 时，材料的相对折射率会随着温度的升高而增大。

所以，在目标温度变化的情况下可以得到下式：

$$K = \eta_0 + \sigma \Delta T \quad (2-13)$$

式中 K 为选取的最终温度时的相对折射率, η_0 为选取的目标初始温度时的相对折射率, ΔT 为选取的最终温度与初始温度的差值。

将式(2-13)代入到(2-8)后得到:

$$\delta = \sqrt{K^2 - \sin^2 \varphi} = \sqrt{(\eta_0 + \sigma \Delta T)^2 - \sin^2 \varphi} \quad (2-14)$$

因此, 得到目标自发辐射发射率平行分量和垂直分量的新关系为:

$$\tau_p = \frac{K^2 \delta^2 + K^2 \cos^2 \varphi + 2K^2 \delta \cos \varphi}{\delta^2 + K^4 \cos^2 \varphi + 2K^2 \delta \cos \varphi} \tau_s \quad (2-15)$$

最后得到目标温度变化的理想光滑表面自发辐射偏振度为:

$$DOP = \frac{|\tau_p(\varphi, \eta_0, \sigma, \Delta T) - \tau_s(\varphi, \eta_0, \sigma, \Delta T)|}{\tau_p(\varphi, \eta_0, \sigma, \Delta T) + \tau_s(\varphi, \eta_0, \sigma, \Delta T)} \quad (2-16)$$

3. 数值模拟

仿真假设某材料在特定波段 25℃ 时的复折射率为 $\eta_0 = 2.973 + 0.8i$, 在 25℃~900℃ 的热光系数为 $\sigma = 0.01/^\circ\text{C}$, 此外, 忽略热膨胀对材料表面的影响。

3.1. 温度对目标自发辐射平行和垂直分量的影响

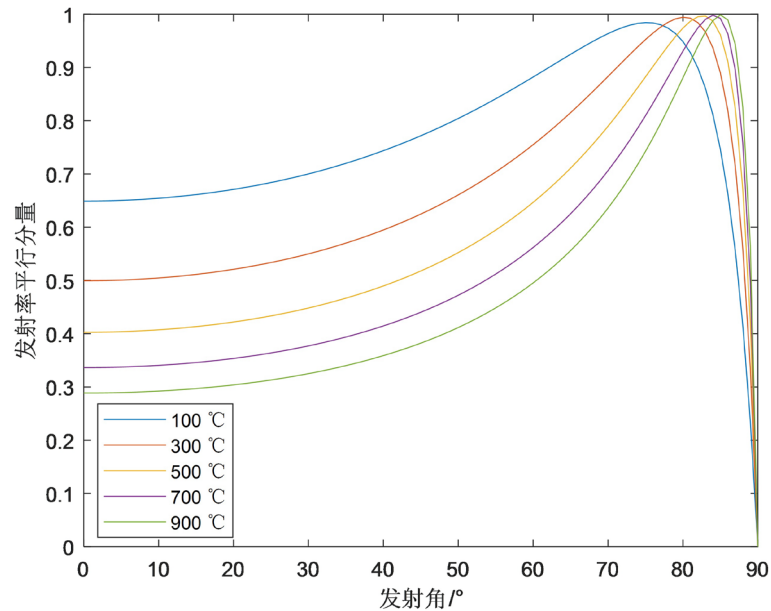


Figure 2. Variation of the parallel component of the spontaneous radiated emissivity of the target with the angle of emissivity

图 2. 目标自发辐射发射率平行分量随发射角的变化图

如图 2 所示, 随着温度的升高, 目标自发辐射发射率平行分量的峰值点向自发辐射角度增大的方向移动。从图像上看, 100℃ 时目标自发辐射发射率平行分量大约在发射角 75° 处, 300℃、500℃、700℃、900℃ 时, 拐点依次向右移动, 在 900℃ 时碳化硅自发辐射发射率平行分量出现在大约 84° 处。到达拐点前, 在相同发射角下, 随着温度升高, 目标自发辐射发射率平行分量的值呈现下降趋势, 而到达拐点后, 在相同发

射角下,随着温度升高,自发辐射发射率平行分量的值则呈现上升趋势。在到达拐点前,100℃时目标自发辐射发射率平行分量上升趋势相对于300℃、500℃、700℃、900℃时目标自发辐射发射率平行分量上升趋势较为平缓,而且随着温度的升高,目标自发辐射发射率平行分量的上升趋势逐渐增大。在到拐点后,100℃的目标自发辐射平行分量下降趋势相对于300℃、500℃、700℃、900℃时的目标自发辐射发射率平行分量下降趋势较为平缓,而且随着温度的升高,目标自发辐射发射率平行分量的下降趋势逐渐增大。

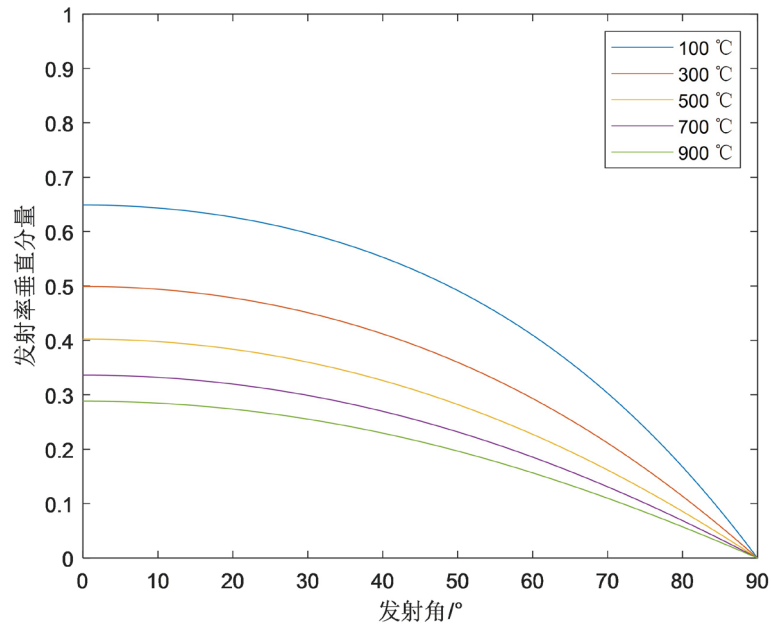


Figure 3. The variation of the vertical component of the spontaneous radiated emissivity of the target with the emission angle

图 3. 目标自发辐射发射率垂直分量随发射角的变化图

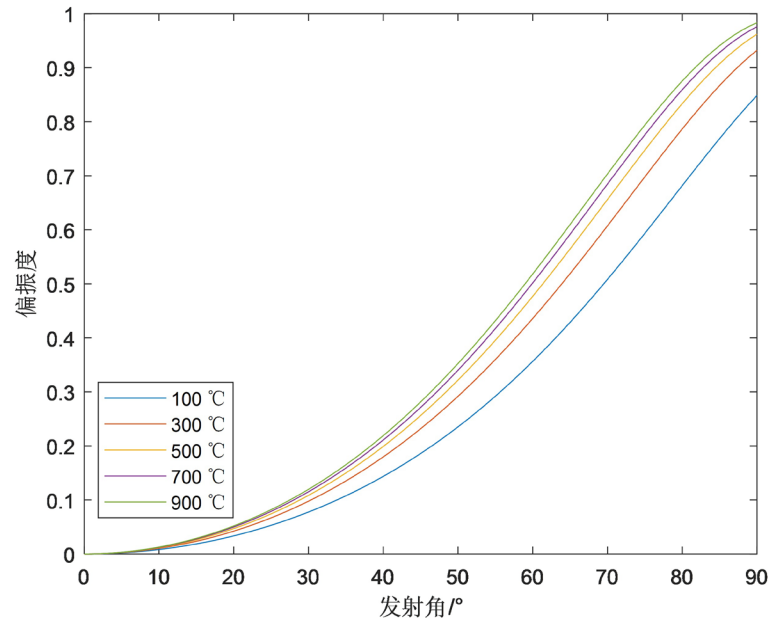


Figure 4. The variation of the degree of polarization of spontaneous radiation of the target with the emission angle

图 4. 目标自发辐射偏振度随发射角的变化图

与目标自发辐射发射率平行分量不同,如图3所示,目标的自发辐射发射率垂直分量在同一发射角下,随着温度的升高整体呈现下降趋势,并没有出现拐点。当发射角增大时,随着温度的升高自发辐射发射率垂直分量在同一发射角的下降幅度变小。

3.2. 温度对碳化硅自发辐射偏振度的影响

图4为不同温度下的目标自发辐射偏振度随发射角变化的曲线图,由图可知,每种温度下偏振度的大小都随着发射角的增大而增大。在不同温度且同一发射角下,目标偏振度随着温度的升高而增大,整体呈现上升趋势。当温度较低时,在发射角较小的情况下,目标偏振度变化并不明显,但在发射角较大时,目标的偏振度变化较为明显。然而,随着温度的升高,无论是在发射角较小时还是发射角较大时,目标的偏振度变化都比较小。

通过数值计算,可以得出随着温度的升高,目标的偏振度整体变大。这是因为对于该目标在一定的温度范围内热光系数为正且数值变化较为稳定的隔热材料,温度升高使其折射率变大,进而改变了目标自发辐射在材料表面-空气处的相位,影响自发辐射发射率平行分量和垂直分量的大小,最终改变了目标自发辐射的偏振度大小。此外,随着温度的升高,材料自发辐射光的偏振度在同一发射角的变化幅度较小,这是因为偏振度变化受到折射率影响的限制。该模型在偏振度随温度的变化规律上与朱德燕等人得到的实验规律在趋势上基本一致[9]。

4. 结论

本文使用了数值分析的方法分析了温度变化对材料自发辐射的偏振特性。根据菲涅尔定律和折射率温度变化关系,分析了不同温度下理想光滑材料自发辐射发射率的平行分量、垂直分量和偏振度随着发射角变化规律。结果表明:1)目标在100℃~900℃的温度下自发辐射发射率平行分量有拐点且拐点的位置随温度的升高向发射角增大的方向移动,在峰值点前温度越大平行分量值越小,然而在峰值点后温度越大平行分量值越大;2)目标在100℃~900℃的温度下,自发辐射发射率垂直分量没有拐点,当温度升高时,垂直分量的值整体减小;3)目标在100℃~900℃的温度下,自发辐射偏振度也没有拐点且随着温度升高偏振度的值整体增大。研究结果可为高温目标的精准定位研究提供相关的理论和技术支持。

参考文献

- [1] Sandus, O. (1965) A Review of Emission Polarization. *Applied Optics*, **4**, 1634-1642. <https://doi.org/10.1364/AO.4.001634>
- [2] Jordan, D.L. and Lewis, G. (1994) Measurement of the Effect of Surface Roughness on the Polarization State of Thermally Emitted Radiation. *Optics Letters*, **19**, 692-694. <https://doi.org/10.1364/OL.19.000692>
- [3] Woff, L.B., Lundberg, A. and Tang, R.J. (1998) Image Understanding from Thermal Emission Polarization. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Santabara, CA, 23-25 Jun 1998, 625-631.
- [4] Jong, W., Cremer, F., Schutte, K., et al. (2000) Usage of Polarization Features of Landmines for Improved Automatic Detection. *Proceedings of SPIE*, **4038**, 1-12.
- [5] Forssell, G. (2005) Model Calculations of Polarization Scattering from 3-Dimensional Objects with Rough Surfaces in the IR Wavelength Region. *Proceedings of SPIE*, **5888**, 1-9. <https://doi.org/10.1117/12.617830>
- [6] Tyo, J., Goldstein, D.L., Chenault, D.B., et al. (2006) Review of Passive Imaging Polarimetry for Remote Sensing Applications. *Applied Optics*, **45**, 5453-5469. <https://doi.org/10.1364/AO.45.005453>
- [7] Ratliff, B.M., LeMaster, D.A., Mack, R.T., et al. (2011) Detection and Tracking of RC Model Aircraft in LWIR Microgrid Polarimeter Data. *Proceedings of SPIE*, **8160**, 1-13. <https://doi.org/10.1117/12.894669>
- [8] 李岩松, 赵慧洁, 李娜, 等. 基于中红外偏振的海面太阳耀光背景下的目标探测[J]. *中国激光*, 2022, 49(19):

296-304.

- [9] 朱德燕, 付晓萱, 唐骏伟, 等. 海面空中目标的红外偏振辐射特性仿真分析[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 175-181.
- [10] 蔡伟, 陈栋, 杨志勇, 等. 热辐射环境下多涂层目标红外偏振特性分析[J]. 光学学报, 2023, 43(22): 49-56.
- [11] Reid, R.B., Oxley, M.E., Eismann, M.T., *et al.* (2006) Quantifying Surface Normal Estimation. *Proceeding of SPIE*, **6240**, 1-11.
- [12] Garcia-Nunez, D. and Michika, D. (1989) The Design of Athermal Infrared Optical Systems. *Proceeding of SPIE*, **1049**, 82-85.
- [13] Tomoyasu, Y., Shuji, S., Zenno, T., *et al.* (2006) Measurement of Refractive Indices of 20 Optical Materials at Low Temperature. *Optical Engineering*, **45**, 083401.