中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

辐射耦合效应对目标红外偏振特性的影响

宿德志 刘亮 吴世永 张纪磊 王坤 刘陵顺

Influence of radiation coupling effect on polarization characteristics of targets

SU De-zhi, LIU Liang, WU Shi-yong, ZHANG Ji-lei, WANG Kun, LIU Ling-shun

引用本文:
宿德志, 刘亮, 吴世永, 张纪磊, 王坤, 刘陵顺. 辐射耦合效应对目标红外偏振特性的影响[J]. 中国光学, 2023, 16(2): 318–328. doi: 10.37188/CO.2022–0035
SU De-zhi, LIU Liang, WU Shi-yong, ZHANG Ji-lei, WANG Kun, LIU Ling-shun. Influence of radiation coupling effect on polarization characteristics of targets[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 318-328. doi: 10.37188/CO.2022-0035

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022–0035

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于红外辐射特性系统实现对面目标测量

Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system

中国光学. 2018, 11(5): 804 https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0804

人工触发闪电通道的辐射特性分析

Analysis of radiation evolution characteristics of the artificial triggered lightning channel

中国光学. 2019, 12(3): 670 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0670

太阳辐射计的衍射效应修正

Diffraction effect correction of solar radiometer

中国光学. 2018, 11(5): 851 https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0851

傅立叶变换型线偏振干涉成像系统分析与设计

Analysis and design of Fourier transform polarization interference imaging system

中国光学. 2019, 12(3): 638 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0638

温度变化对金属Ag膜反射镜偏振特性的影响研究

Influence of temperature variation on polarization characteristics of silver thin film mirror

中国光学. 2018, 11(4): 604 https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0604

双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用

Application of bimorph mirror in the optical system of synchrotron radiation light source

中国光学. 2017, 10(6): 699 https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0699

文章编号　2097-1842(2023)02-0318-11

辐射耦合效应对目标红外偏振特性的影响

宿德志[1], 刘　亮[2*], 吴世永[1], 张纪磊[1], 王　坤[1], 刘陵顺[1]
（1. 海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264001;
2. 海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264001）

摘要: 红外偏振成像技术具有探测距离远, 目标识别率高等多种优势, 但在复杂环境下目标偏振特性易受背景辐射影响, 使得红外偏振设备的探测能力大幅降低。本文基于偏振双向反射分布函数, 综合考虑目标和背景间的辐射耦合效应, 建立了目标偏振度计算模型。对比研究了有强辐射背板和无强辐射背板两种情况下目标偏振度的变化情况, 并针对陆基和机载探测等小角度探测情况, 仿真研究了目标和背板的温度、夹角等参数对目标偏振度的影响规律。研究结果表明: 目标和背板温度相同时, 辐射耦合效应会显著降低目标的偏振度, 但不会改变目标偏振度随温度升高而增大的趋势。当目标和背板温度为 30 °C、40 °C 和 50 °C 时, 目标偏振度的最大值分别为无强辐射背板时的 63.7%、44.9% 和 42.2%。可见温度越高, 目标和背板间的辐射耦合效应越强, 目标偏振度降低的比例越大。此外, 辐射耦合效应的强弱不仅与温度有关, 还与目标和背板的夹角有关。随着夹角的增大, 目标偏振度先增大后减小, 且在夹角约为 105°处取得极大值。因此, 辐射耦合效应会在一定程度上改变目标偏振度, 从而影响红外偏振设备的探测能力。最后, 通过搭建的长波红外偏振成像系统, 对建立的目标偏振度计算模型进行了实验验证, 实验结果与仿真分析结果基本一致。本文研究成果对提升陆基和机载红外偏振设备的探测和识别能力具有一定的指导意义。

关　键　词: 红外辐射; 线偏振度; 偏振双向反射分布函数; 辐射耦合效应
中图分类号: TP72　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2022-0035

Influence of radiation coupling effect on polarization characteristics of targets

SU De-zhi[1], LIU Liang[2*], WU Shi-yong[1], ZHANG Ji-lei[1], WANG Kun[1], LIU Ling-shun[1]
（1. *College of Basic Sciences for Aviation*, *Naval Aviation University*, *Yantai* 264001, *China*;
2. *Coast Guard College*, *Naval Aviation University*, *Yantai* 264001, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *liul*513@126.*com*

Abstract: Infrared polarization imaging technology has the advantages of long detection range and high rate of target recognition. However, the polarization characteristics of targets are easily affected by background radiation in complex environments, which significantly reduces the detection capability of infrared polarization equipment. Based on the polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function (pBRDF), this paper establishes a calculation model for the target's Degree of Linear Polarization (DoLP), comprehensively considering the radiation coupling effect between the target and the background. The variation of the target's

收稿日期: 2022-03-06; **修订日期:** 2022-04-06
基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No. 61205206)
Supported by National Natural Science Funds of China (No. 61205206)

DoLP under two conditions - with and without a strong radiation backplate – is then comparatively studied. Additionally, in order to solve problems of land-based and airborne small-angle detection, simulation research is done to find out how the target's DoLP is influenced by parameters such as the temperatures and the included angle between the target and the backplate. Research results show that the radiation coupling effect significantly reduces the target's degree of polarization when the temperatures of the target and the backplate are the same, but it does not change the trend of the target's degree of polarization, which increases with an increase in temperature. When the temperature of the target and the backplate is 30 °C, 40 °C, and 50 °C, the maximum degree of polarization of the target is 63.7%, 44.9%, and 42.2% of those without a strong radiation backplate, respectively. It can be concluded then that the higher the temperature, the stronger the radiation coupling effect between the target and the backplate, and the greater the reduction of the target's degree of polarization; and that the strength of the radiation coupling effect is not only related to the temperature, but also to the included angle between the target and the backplate. With the increase of the included angle, the target's DoLP first increases and then decreases, and the maximum value is obtained when the included angle is about 105°. Therefore, the radiation coupling effect changes the target's DoLP to a certain extent, thereby affecting the detection ability of the infrared polarization equipment. Finally, through building a long-wave infrared polarization imaging system, the established calculation model of the target's degree of polarization is verified by experiments, whose results are basically consistent with those of the simulation analysis. Overall, the research results in this paper have certain guiding significance for improving the detection and identification capabilities of land-based and airborne infrared polarization equipment.

Key words: infrared radiation; Degree of Linear Polarization (DoLP); polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function (pBRDF); radiation coupling effect

1　引　言

红外偏振探测技术因具有隐蔽性好、探测距离远、识别率高等优点，展现出良好的应用前景[1]，并被广泛应用于光学遥感[2-4]、水下探测[5]和海面舰船目标的探测和识别[6-8]等多个领域。目标偏振特性研究是红外偏振探测识别的关键技术之一，近些年国内外学者针对多种材料进行了研究。文献 [9−10] 研究了海面的红外偏振特性，结果表明海面偏振度与探测角和风速等多种因素有关。文献 [11−12] 测量了粗糙硼硅酸盐玻璃基体的偏振特性，并仿真了光滑物体表面的自发辐射偏振特性。文献 [13] 测量了钛合金和碳纤维材料等飞机材料的偏振特性，文献 [14] 测量了钛合金为基底的红外伪装涂层的偏振特性。文献 [15] 分析和测量了热控涂层材料 SR107 和 S781 的偏振特性。

根据偏振双向反射分布函数模型[16]，目标的偏振特性不仅与材质有关，还受观测角、粗糙度和温度等因素影响。文献 [17] 研究了温度和观测角对涂漆目标和镀铝目标偏振特性的影响，发现目标偏振度随辐射温度差值及探测角度差值的增大而增大。文献 [18] 定量分析了表面粗糙度和入射角对铝板和玻璃目标红外辐射偏振度的影响，得到了目标辐射偏振度随粗糙度的增大而减小的结论，并进行了实验验证。文献 [19] 研究了表面光滑程度对铝质和钢质金属板热红外偏振度的影响，结果表明大观测角下表面越光滑偏振度越大。文献 [20] 研究了观测角、目标表面性质等因素对金属材料(45#钢)偏振特性的影响，并建立了三分量偏振双向反射分布函数模型。文献 [21] 研究了粗糙度和观测角等因素对镍合金散射偏振特性的影响。上述研究均仅针对特定材料进行偏振特性测量和建模，未考虑背景环境的影响，但由于背景环境会发出热辐射和反射热辐射，并与被测材料间产生热辐射相互作用，即辐射耦合效应(Radiation Coupling Effect, RCE)，从而改变目标

偏振特性的测量结果。文献 [22−23] 指出长波红外波段目标的偏振特性受环境因素影响较大，文献 [24] 和 [25] 的研究表明当环境辐射与目标辐射强度接近时能观测到明显的退偏振效应。在此基础上，文献 [26] 对海洋背景下的目标偏振特性进行了研究，发现海面与舰船之间的辐射耦合效应会明显改变舰船目标偏振度。对于陆基和机载探测设备而言，通常为小角度探测[27]，因此，舰船甲板与上层建筑间的辐射耦合效应必然对目标偏振度测量结果产生影响。

本文针对海上舰船目标的小角度红外偏振探测问题，以偏振双向反射分布函数 Hyde 模型为基础，综合考虑辐射耦合效应，建立目标偏振度计算模型，分析了辐射耦合效应对目标红外偏振特性的影响。通过长波红外偏振成像设备测量了不同温度和金属板夹角下的目标偏振特性，实验结果验证了本文模型的正确性。研究结果对提高舰船目标的偏振探测能力具有一定指导意义。

2 理论推导

针对小角度探测，将舰船甲板与其上的建筑模型分别简化为成一定角度的目标板和背景板（以下分别简称目标和背板），如图 1 所示。进入探测器的能量包括目标发出的热辐射（Object Thermal Radiation, OTR）、目标到传感器之间的路程辐射 (Path Radiation, PR)、目标反射的热辐射 3 部分，其中目标反射的热辐射又分为环境热辐射 (Reflected Surroundings Radiation from the Object, RSRO)、背板发出的热辐射 (Reflected Background plate Thermal Radiation, RBTR) 和背板反射的环境热辐射 (Reflected Surroundings Radiation from Background, RSRB)3 部分。由于路程辐射总体上未表现出偏振现象，对目标偏振度的影响很小[28]，因此本文进行偏振度建模时，只考虑目标热辐射、目标反射的热辐射这两个影响因素。

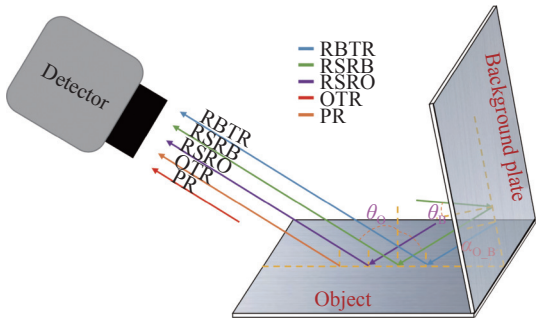

图 1 红外辐射模型。θ_O和θ_B分别为目标和背板的入射角，α_{O_B}为目标和背板的夹角

Fig. 1 The model of infrared radiation. θ_O and θ_B are the incidence angle of the object and the background plate respectively; α_{O_B} is the angle between the object and the background plate

2.1 pBRDF 模型

目标偏振特性与探测角、表面粗糙度和折射率等多种因素有关，通常采用偏振双向反射分布函数（pBRDF）进行描述。Priest 和 Germer 以 T-S 微面元模型为基础建立了首个严格意义上的 pBRDF 模型[29]，该模型通过穆勒矩阵将标量 BRDF 推广到偏振矢量模型。而 Hyde 等对 Priest 和 Germer 建立的模型进行了改进，增加了几何衰减因子和漫反射分量，提高了模型的模拟精度，是较为完整和准确的 pBRDF 模型[30]。本文以该模型为基础进行偏振度建模，模型中假定粗糙表面反射的能量包括镜面反射和漫反射两部分，所以对应的偏振双向反射分布函数也包括两部分

$$\boldsymbol{f}(\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r,\theta)=\boldsymbol{f}^s+\boldsymbol{f}^d=\begin{pmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} & f_{03} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{30} & f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix}, \tag{1}$$

其中镜面反射部分$\boldsymbol{f}^s$采用微面元方法求解，当微面元法向分布满足高斯分布时，其表达式为

$$\boldsymbol{f}^s(\theta,\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r)=\frac{\exp\left(\dfrac{-\tan^2\theta}{2\sigma^2}\right)}{8\pi\,\sigma^2\cos^4\theta\cos\theta_i\cos\theta_r}G(\theta,\theta_i,\theta_r,\beta)\boldsymbol{M}(\theta_i,\theta_r,\phi_i,\phi_r), \tag{2}$$

其中$G(\theta,\theta_i,\theta_r,\beta)$为几何衰减因子，$\boldsymbol{M}(\theta_i,\theta_r,\phi_i,\phi_r)$为镜面反射的穆勒矩阵，$\beta$为入射方向与微面元法线$z_\mu$的夹角。$\sigma$为目标表面斜率方差，$\theta$为微面元法线$z_\mu$与目标表面法线 z 的夹角；θ_i和θ_r分别为入射角和反射角，ϕ_i和ϕ_r为入射光和反射光的方位角，如图 2 所示。几何衰减因子可以表示为

$$G(\theta,\theta_i,\theta_r,\beta)=\min\left(1;\frac{2\cos\theta\cos\theta_r}{\cos\beta};\frac{2\cos\theta\cos\theta_i}{\cos\beta}\right),$$

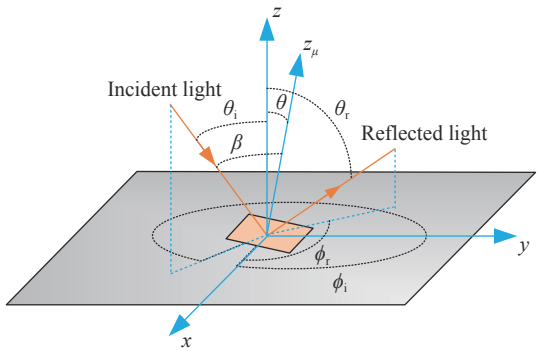

图 2　微面元模型几何关系

Fig. 2　Geometric relationships of micro-surface model

根据几何关系, 可以得到以下关系

$$\begin{cases} \cos\theta = \dfrac{\cos\theta_i + \cos\theta_r}{2\cos\beta} \\ \cos 2\beta = \cos\theta_i\cos\theta_r + \sin\theta_i\sin\theta_r\cos(\phi_r - \phi_i) \end{cases}. \tag{3}$$

式 (2) 中, 镜面反射穆勒矩阵$\boldsymbol{M}(\theta_i,\theta_r,\phi_i,\phi_r)$可用其与琼斯矩阵的对应关系求解[31],

$$\boldsymbol{M} = \begin{pmatrix} M_{00} & M_{10} & 0 & 0 \\ M_{10} & M_{00} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{22} & \mathrm{j}M_{32} \\ 0 & 0 & -\mathrm{j}M_{32} & M_{22} \end{pmatrix}, \tag{4}$$

其中, $M_{00} = \dfrac{R_s + R_p}{2}$, $M_{10} = \dfrac{R_s - R_p}{2}$, R_s、R_p代表s波和p波的能量反射系数, 可用菲涅耳反射定律求解, 对于复折射率为$\tilde{n} = n + \mathrm{i}k$的物质[32],

$$\begin{cases} R_s(\alpha,\tilde{n}) = \dfrac{(A-\cos\alpha)^2 + B^2}{(A+\cos\alpha)^2 + B^2} \\ R_p(\alpha,\tilde{n}) = R_s\dfrac{(A-\sin\alpha\tan\alpha)^2 + B^2}{(A+\sin\alpha\tan\alpha)^2 + B^2} \\ A = \sqrt{\dfrac{\sqrt{4n^2k^2 + (n^2-k^2-\sin\alpha^2)^2} + (n^2-k^2-\sin\alpha^2)}{2}} \\ B = \sqrt{\dfrac{\sqrt{4n^2k^2 + (n^2-k^2-\sin\alpha^2)^2} - (n^2-k^2-\sin\alpha^2)}{2}} \end{cases} \tag{5}$$

式 (5) 中α为入射角, 当不考虑表面小面元间的相互遮挡时, 由偏振双向反射分布函数可求得半球反射率

$$\rho^s_{\mathrm{DHR}} = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} f^s_{00}(\theta,\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r)\cos\theta_r\sin\theta_r\mathrm{d}\theta_r\mathrm{d}\phi_r. \tag{6}$$

考虑到漫反射分量f^d为目标表面多次反射后得到的, 通常是无偏的, 则可以用半球反射率和能量守恒定律求解得到漫反射分量,

$$f^d_{00}(\theta_r,\phi_r) = \frac{1}{\pi}\left(1 - \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} f^s_{00}(\theta,\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r)\cos\theta_r\sin\theta_r\mathrm{d}\theta_r\mathrm{d}\phi_r\right). \tag{7}$$

此时有, $f_{00} = f^s_{00}(\theta,\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r) + f^d_{00}(\theta_r,\phi_r)M_{00}$, 因此,

$$\mathrm{d}\boldsymbol{S}_r(\theta_r,\phi_r) = \boldsymbol{f}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}_i(\theta_i,\phi_i) = \begin{pmatrix} f^s_{00} + f^d_{00}M_{00} & f^s_{01} & f^s_{02} & f^s_{03} \\ f^s_{10} & f^s_{11} & f^s_{12} & f^s_{13} \\ f^s_{20} & f^s_{21} & f^s_{22} & f^s_{23} \\ f^s_{30} & f^s_{31} & f^s_{32} & f^s_{33} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} S^i_0 \\ S^i_1 \\ S^i_2 \\ S^i_3 \end{pmatrix}, \tag{8}$$

式 (8) 中$\left(S^i_0\ S^i_1\ S^i_2\ S^i_3\right)^{\mathrm{T}}$为入射光的 Stokes 矢量, 其常用表达式为$\boldsymbol{S} = (S_0\ S_1\ S_2\ S_3)^{\mathrm{T}}$, 其中$S_0$表示光的总强度, S_1表示水平方向光强和垂直方向光强之差; S_2和S_3表示水平光波和垂直光波振幅与相位的调制关系; 偏振探测中, 因S_3成分较小通常可省略。因此, 根据 Stokes 矢量可以求解出偏振光的线偏振度(Degree of Linear Polarization, DoLP)为

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}. \tag{9}$$

2.2　考虑耦合效应的偏振度模型

2.2.1　辐射偏振度模型

任何温度大于绝对零度的物体都会向外发出热辐射。不考虑热辐射穿透物体损失的能量时, 根据能量守恒定律以及基尔霍夫定律可知物体的定向发射率为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{DE}} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{BB}} - \int f_{\mathrm{O}}\cos\theta_i\mathrm{d}\Omega_i\cdot\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{BB}},$$

其中$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{BB}} = [1\ 0\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$为黑体发射率矩阵, f_{O}为目标的偏振双向反射分布函数, 则物体表面红外辐射定向发射率为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{DE}} = \begin{pmatrix} 1 - \int[f^s_{\mathrm{O},00} + f^d_{\mathrm{O},00}M_{\mathrm{O},00}]\cos\theta_r\mathrm{d}\Omega_r \\ -\int f^s_{\mathrm{O},10}\cos\theta_r\mathrm{d}\Omega_r \\ -\int f^s_{\mathrm{O},20}\cos\theta_r\mathrm{d}\Omega_r \\ -\int f^s_{\mathrm{O},30}\cos\theta_r\mathrm{d}\Omega_r \end{pmatrix}, \tag{10}$$

式中$M_{\mathrm{O},00}$为目标穆勒矩阵的第一个分量, 则目标红外辐射的 Stokes 矢量为

$$\begin{pmatrix} S_{\mathrm{OTR},0} \\ S_{\mathrm{OTR},1} \\ S_{\mathrm{OTR},2} \\ S_{\mathrm{OTR},3} \end{pmatrix} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{DE}} * I_{\mathrm{OTR}} = \begin{pmatrix} I_{\mathrm{OTR}}(1-\int[f^s_{\mathrm{O},00}+f^d_{00}M_{\mathrm{O},00}]\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}}) \\ -I_{\mathrm{OTR}}\int f^s_{\mathrm{O},10}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ -I_{\mathrm{OTR}}\int f^s_{\mathrm{O},20}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ -I_{\mathrm{OTR}}\int f^s_{\mathrm{O},30}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \end{pmatrix}, \tag{11}$$

式中I_{OTR}为目标热辐射的强度，则根据式 (9) 可求解目标辐射偏振度为

$$DoLP_{\mathrm{OTR}} = \frac{\sqrt{(S_{\mathrm{OTR},1})^2+(S_{\mathrm{OTR},2})^2}}{S_{\mathrm{OTR},0}} . \tag{12}$$

2.2.2 反射偏振度模型

探测器接收到的能量包括目标发出的热辐射和反射的热辐射两部分，如图 1 所示，由于需要考虑辐射耦合效应，目标反射的热辐射不仅有环境热辐射 (RSRO)，还有背板反射的环境热辐射 (RSRB) 和背板发出的热辐射 (RBTR)。根据式 (8) 可知求解反射光的斯托克斯矢量需要计算f和目标表面入射光的斯托克斯矢量$\boldsymbol{S}_{\mathrm{i}}$，$f$可由式(2)至(7)求解；根据图 1 可知，$\boldsymbol{S}_{\mathrm{i}}$包括环境热辐射$\boldsymbol{S}_{\mathrm{RSRO}}$、背板热辐射$\boldsymbol{S}_{\mathrm{RBTR}}$和背板反射的环境热辐射$\boldsymbol{S}_{\mathrm{RSRB}}$等 3 部分，

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{i}} = \boldsymbol{S}_{\mathrm{RSRO}} + \boldsymbol{S}_{\mathrm{RBTR}} + \boldsymbol{S}_{\mathrm{RSRB}} . \tag{13}$$

由于环境热辐射是无偏的，式 (3) 可以写为

$$\begin{pmatrix} S_{\mathrm{i},0} \\ S_{\mathrm{i},1} \\ S_{\mathrm{i},2} \\ S_{\mathrm{i},3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{\mathrm{SR}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S_{\mathrm{RBTR},0} \\ S_{\mathrm{RBTR},1} \\ S_{\mathrm{RBTR},2} \\ S_{\mathrm{RBTR},3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S_{\mathrm{RSRB},0} \\ S_{\mathrm{RSRB},1} \\ S_{\mathrm{RSRB},2} \\ S_{\mathrm{RSRB},3} \end{pmatrix}, \tag{14}$$

式 (14) 中，I_{SR}为环境热辐射的强度，$\boldsymbol{S}_{\mathrm{RBTR}}$的求解与 2.2.1 节类似，可根据式(10)和(11)计算得到

$$\begin{pmatrix} S_{\mathrm{RBTR},0} \\ S_{\mathrm{RBTR},1} \\ S_{\mathrm{RBTR},2} \\ S_{\mathrm{RBTR},3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{\mathrm{BTR}}\left[1-\int\left(f^s_{\mathrm{B},00}+f^d_{\mathrm{B},00}M_{\mathrm{B},00}\right)\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}}\right] \\ -I_{\mathrm{BTR}}\int f^s_{\mathrm{B},10}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ -I_{\mathrm{BTR}}\int f^s_{\mathrm{B},20}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ -I_{\mathrm{BTR}}\int f^s_{\mathrm{B},30}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \end{pmatrix}, \tag{15}$$

其中$f^s_{\mathrm{B},00}$、$f^d_{\mathrm{B},00}$、$M_{\mathrm{B},00}$分别为背板镜面反射、漫反射双向反射分布函数和穆勒矩阵的第一个分量，I_{BTR}为背板热辐射强度。而环境热辐射经背板反射后得到的$\boldsymbol{S}_{\mathrm{RSRB}}$，可根据菲涅尔反射定律进行求解，得到

$$\begin{pmatrix} S_{\mathrm{RSRB},0} \\ S_{\mathrm{RSRB},1} \\ S_{\mathrm{RSRB},2} \\ S_{\mathrm{RSRB},3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{\mathrm{SR}}\int(f^s_{\mathrm{B},00}+f^d_{\mathrm{B},00}M_{\mathrm{B},00})\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ I_{\mathrm{SR}}\int f^s_{\mathrm{B},10}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ I_{\mathrm{SR}}\int f^s_{\mathrm{B},20}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ I_{\mathrm{SR}}\int f^s_{B,30}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \end{pmatrix}, \tag{16}$$

则根据式(13)可得

$$\begin{pmatrix} S_{\mathrm{i},0} \\ S_{\mathrm{i},1} \\ S_{\mathrm{i},2} \\ S_{\mathrm{i},3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{\mathrm{SR}}+I_{\mathrm{BTR}}[1-\int(f^s_{\mathrm{B},00}+f^d_{\mathrm{B},00}M_{\mathrm{B},00})\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}}]+ \\ I_{\mathrm{SR}}\int(f^s_{\mathrm{B},00}+f^d_{\mathrm{B},00}M_{\mathrm{B},00})\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ -I_{\mathrm{BTR}}\int f^s_{\mathrm{B},10}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}}+I_{\mathrm{SR}}\int f^s_{\mathrm{B},10}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ -I_{\mathrm{BTR}}\int f^s_{\mathrm{B},20}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}}+I_{\mathrm{SR}}\int f^s_{\mathrm{B},20}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ -I_{\mathrm{BTR}}\int f^s_{\mathrm{B},30}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}}+I_{\mathrm{SR}}\int f^s_{\mathrm{B},30}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \end{pmatrix}, \tag{17}$$

则，根据式 (8) 可求得目标反射热辐射的斯托克斯矢量为

$$\begin{pmatrix} S_{\mathrm{r},0} \\ S_{\mathrm{r},1} \\ S_{\mathrm{r},2} \\ S_{\mathrm{r},3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int(f^s_{\mathrm{O},00}+f^d_{\mathrm{O},00}M_{\mathrm{O},00})\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},01}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},02}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},03}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ \int f^s_{\mathrm{O},10}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},11}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},12}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},13}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ \int f^s_{\mathrm{O},20}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},21}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},22}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},23}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \\ \int f^s_{\mathrm{O},30}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},31}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},32}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} & \int f^s_{\mathrm{O},33}\cos\theta_{\mathrm{r}}\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{\mathrm{i},0} \\ S_{\mathrm{i},1} \\ S_{\mathrm{i},2} \\ S_{\mathrm{i},3} \end{pmatrix}, \tag{18}$$

考虑到入射和反射光线在同一平面[33]，式 (18) 可简化为

$$\begin{pmatrix} S_{r,0} \\ S_{r,1} \\ S_{r,2} \\ S_{r,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int (f^s_{O,00} + f^d_{O,00} M_{O,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * \left\{ I_{SR} + I_{BTR}[1 - \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r] + I_{SR} \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r \right\} + \int f^s_{O,01} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * (-I_{BTR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r + I_{SR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r) \\ \int f^s_{O,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * \left\{ I_{SR} + I_{BTR}[1 - \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r] + I_{SR} \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r \right\} + \int f^s_{O,11} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * (-I_{BTR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r + I_{SR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{19}$$

根据式(9)可得目标反射偏振度为

$$DoLP_r = \frac{\sqrt{(S_{r,1})^2 + (S_{r,2})^2}}{S_{r,0}} . \tag{20}$$

2.2.3　目标偏振度模型

综合 2.2.1 和 2.2.2 节的分析, 可得到探测器接收到热辐射的斯托克斯矢量为

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{OTR,0} \\ S_{OTR,1} \\ S_{OTR,2} \\ S_{OTR,3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S_{r,0} \\ S_{r,1} \\ S_{r,2} \\ S_{r,3} \end{pmatrix} . \tag{21}$$

根据式(11)和式(19)可得进一步计算得到

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{OTR}(1 - \int [f^s_{O,00} + f^d_{00} M_{O,00}] \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r) + \int (f^s_{O,00} + f^d_{O,00} M_{O,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * \left\{ I_{SR} + I_{BTR}[1 - \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r] + I_{SR} \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r \right\} + \int f^s_{O,01} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * (-I_{BTR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r + I_{SR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r) \\ -I_{OTR} \int f^s_{O,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r + \int f^s_{O,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * \left\{ I_{SR} + I_{BTR}[1 - \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r] + I_{SR} \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r \right\} + \int f^s_{O,11} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * (-I_{BTR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r d\Omega_r + I_{SR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

根据线偏振度计算式 (9), 可求得考虑了辐射耦合效应时目标偏振度计算公式为

$$\begin{aligned} DoLP = & \Big\{ \Big| -I_{OTR} \int f^s_{O,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r + \int f^s_{O,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * \Big\{ I_{SR} + I_{BTR}[1 - \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r] + \\ & I_{SR} \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r \Big\} + \int f^s_{O,11} \cos\theta_r d\Omega_r * (-I_{BTR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r d\Omega_r + I_{SR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r) \Big| \Big\} \Big/ \\ & \Big\{ I_{OTR}(1 - \int [f^s_{O,00} + f^d_{00} M_{O,00}] \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r) + \int (f^s_{O,00} + f^d_{O,00} M_{O,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * \Big\{ I_{SR} + I_{BTR}[1 - \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \\ & \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r] + I_{SR} \int (f^s_{B,00} + f^d_{B,00} M_{B,00}) \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r \Big\} + \int f^s_{O,01} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r * (-I_{BTR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r + \\ & I_{SR} \int f^s_{B,10} \cos\theta_r \mathrm{d}\Omega_r) \Big\}, \end{aligned} \tag{22}$$

应当注意, 式 (22) 中各分量的计算要用到目标的入射角θ_O和背板的入射角θ_B, 而这两个角度不是独立的, 根据图 1 中的几何关系, 这两个角度和探测角α_D、目标与背板的夹角α_{O_B}满足如下关系

$$\begin{cases} \theta_O = \pi/2 - \alpha_D \\ \theta_B = |\alpha_{O_B} - \theta_O| \end{cases}, \tag{23}$$

因此, 目标偏振特性与其材质、表面粗糙度、探测角和目标与背板的夹角等因素有关。

3　目标偏振特性仿真与实验验证

3.1　目标偏振特性仿真

为方便与实验结果对比, 仿真中设置探测角$\alpha_D = 15°$, 目标和背板的表面粗糙度为 1 μm, 目标和背板折射率均设置为 1.5+1.3i。由于雷达隐身的需要, 舰船的上层建筑通常采用内倾式设计[34], 因此仿真中设置目标与背板夹角α_{O_B}的变化范围为 87°~141°。根据式(22)可计算出对应的背板观测角θ_B范围为 12°~66°, 所有仿真均在这个角度范围进行。为研究辐射耦合效应对目标偏振特性的影响, 设置目标和背板温度均为 30 °C, α_{O_B}从 87°变化至 141°。根据本文提出的偏振度模型, 计算了目标的偏振度、辐射偏振度和反射偏振度, 结果如图 3 所示。

从图 3(a) 可以看出, 各入射角下都有$R_s > R_p$, 根据基尔霍夫定律可知目标热辐射能量主要集中在 p 偏振方向, 其斯托克斯分量$S_{OTR,1} < 0$, 当入射光为自然光时, 目标反射的热辐射中 s 偏振方向能量始终大于 p 偏振方向, 其分量$S_{r,1} > 0$, 所以自然光照射目标时, 目标偏振度与辐射和入射的能量比例有关。图 3(b) 分别给出了考虑热辐射耦合效应和不考虑热辐射耦合效应两种情况下的目标偏振度曲线, 可以看到辐射耦合效应使得目标的偏振度大幅度降低, 且目标偏振度随α_{O_B}先增大, 后减小。为进一步分析产生这种变化的原因, 根据式 (12) 和 (20) 分别计算了目标的辐射偏振度和反射偏振度 (如图 3(c) 所示)。可以看到目标的辐射偏振度不随α_{O_B}变化, 而反射偏振度会随α_{O_B}先增大后减小。这主要是因为考虑耦合效应时, 入射到目标表面的热辐射不再是自然光, 而是部分偏振光, 这会影响目标偏振度的测量结果。因此在对舰船目标进行小角度红外偏振探测

时，必须考虑甲板与上层建筑间的热辐射耦合效应。

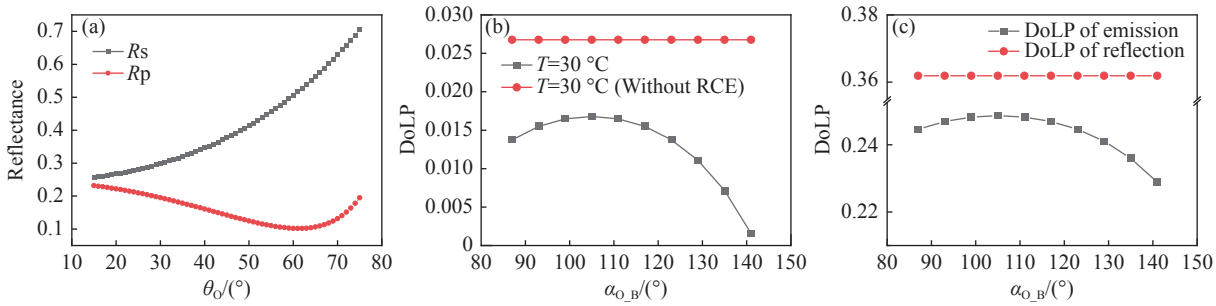

图 3 辐射耦合效应对目标偏振度的影响。(a)s, p 方向的反射率；(b)目标偏振度；(c)目标的辐射偏振度和反射偏振度

Fig. 3 Influence of RCE on the DoLP of object. (a) Reflectance of the s-polarized and p-polarized components; (b) DoLP of the object; (c) the DoLP of reflection and emission of object

下面进一步分析温度对目标偏振特性的影响，仿真中，依次设置目标和背板的温度均为 30 °C, 40 °C 和 50 °C，得到本文模型计算的目标偏振度，如图 4 所示。

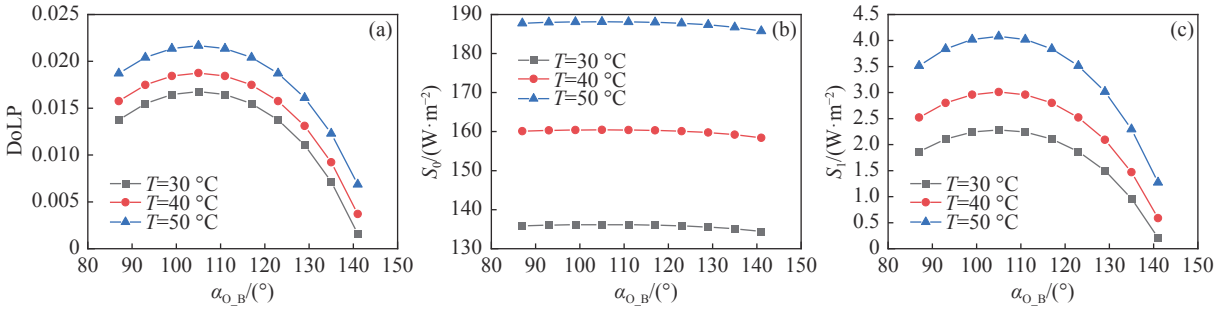

图 4 温度对目标偏振度的影响。(a)目标偏振度；(b)S_0分量；(c)S_1分量

Fig. 4 Influence of temperature on the DoLP of the object. (a) DoLP of the object; (b) S_0 component of the object; (c) S_1 component of the object

对比图 3(b) 和图 4(a)，可以看到温度的变化不改变目标偏振度随α_{O_B}的变化趋势，且目标偏振度随目标和背板的温度升高而增大。为解释这一现象计算了不同温度下目标的S_0和 S_1分量，计算结果如图 4(b) 和 (c) 所示，可以看到随着温度升高，目标的S_0和S_1分量会同时增大，但S_1分量增大的比例较大，从而导致目标偏振度随温度升高而增大。

3.2 实验验证

为验证本文推导的偏振度计算模型，搭建了长波红外偏振成像系统，其工作波段为 8~14 μm，分辨率为640 pixel×512 pixel，像元尺寸为17 μm，噪声等效温差为 39 mK。目标和背板为涂漆铝板，其折射率为 1.5+1.3i，表面粗糙度为1 μm。将加热板固定在目标和背板后面，同时将目标水平放置，背板固定在竖直转台上，使得可以调节目标和背板的温度及夹角。

实验中，室内温度为 4 °C，固定视轴与水平面的夹角为 15°，通过加热板将目标和背板加热至指定温度，待温度稳定后，旋转偏振片采集 4 幅不同偏振方向(0°, 45°, 90°, 135°)的灰度图像，然后旋转竖直转台，改变目标与背板的夹角从 87°增大至 141°，再重复进行偏振图像采集。实验中采集了目标温度为 30 °C、40 °C 和 50 °C 时，不同α_{O_B}下的偏振度图像，如图 5 所示。可以看到目标的偏振度随目标与背板夹角的增大呈先增大再减小趋势，与 3.1 节仿真计算结果基本一致。此外，当α_{O_B}较大时，由于辐射耦合区域无法覆盖全部目标，实验中可以观察到在非耦合区域目标的偏振度明显大于耦合区域。为验证耦合效应的影响，实验中去掉背板后，再次测量目标偏振度，见图 5 最后一列，能够观察到没有辐射耦合效应时目标偏振度明显增大，这与 3.1 节仿真分析结果是一致的。

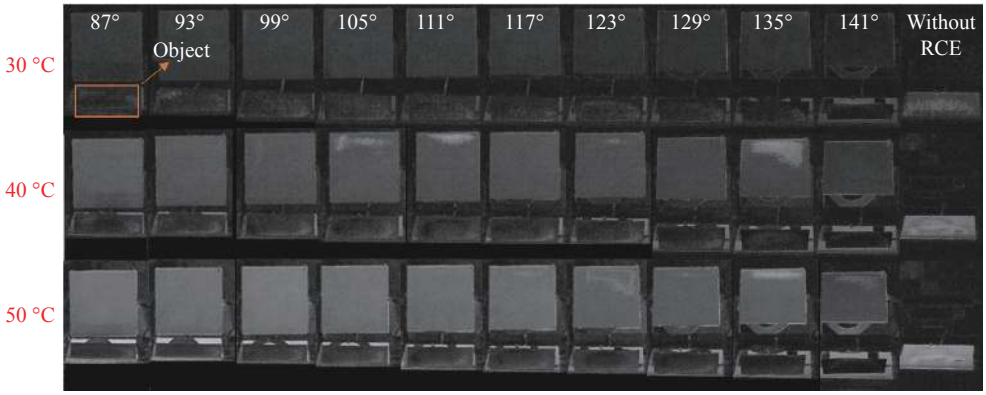

图 5　目标偏振度图像(从上到下, 目标温度分别为 30 °C、40 °C、50 °C; 从左到右 α_{O_B} 为 87°~141°, 最右侧一列为无辐射耦合效应实验结果)

Fig. 5　The DoLP images of the object. Up to down, the object temperatures are 30 °C, 40 °C and 50 °C. Left to right, α_{O_B} are from 87° to 141°. The rightmost column is the DoLP images without RCE

为进一步分析, 图 6 给出了仿真结果与实验结果的详细对比。从图 6(a) 中可以看出实验结果与仿真结果符合较好, 目标偏振度呈现先增大再减小的趋势, 在α_{O_B} = 105°时目标偏振度取最大值, 同时随着温度升高, 目标偏振度增大, 实验结果与 3.1 节仿真分析结果是一致的, 这也验证了本文提出的偏振度模型的准确性。

从图 6(b)~6(d) 中可以看出辐射耦合效应使得目标偏振度明显降低, 温度为 30 °C 时, 辐射耦合效应使得目标偏振度低于原来的 63.7%; 温度为 40 °C 时低于原来的 44.9%; 温度为 50 °C 时, 目标偏振度值小于无辐射耦合效应时的 42.2%。可见随着温度升高, 辐射耦合效应会更明显, 目标偏振度幅值降低比例增大。

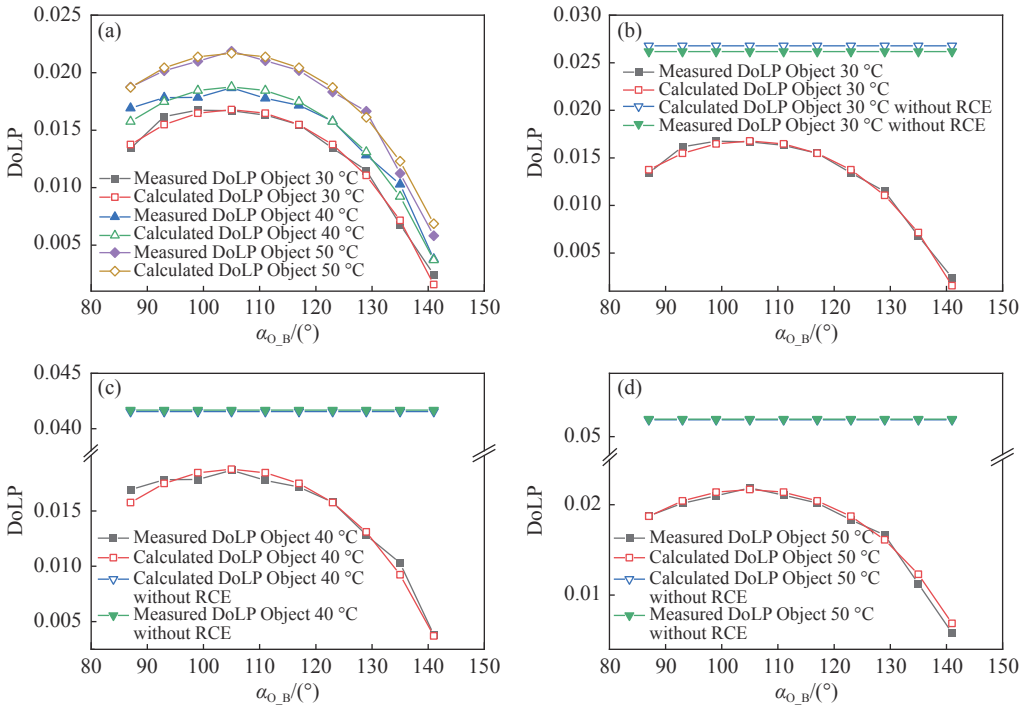

图 6　不同温度下的目标偏振度。(a)仿真与实验结果对比; (b)30 °C 对比结果; (c)40 °C 对比结果; (d)50 °C 对比结果

Fig. 6　The DoLP of the object at different temperatures. (a) Comparison between the simulation results and the experimental results; (b) comparison results at 30 °C; (c) comparison results at 40 °C; and (d) comparison results at 50 °C

4 结 论

本文在考虑辐射耦合效应情况下，建立了目标偏振度模型，分析了辐射耦合效应、温度等对目标偏振特性的影响，并进行了实验验证。仿真和实验结果表明，小探测角时辐射耦合效应会降低目标偏振度，且与目标和背板的夹角有关，目标偏振度随夹角增大的变化趋势为先增大再减小。随着温度升高，目标偏振度会增加，但辐射耦合效应使得目标的偏振度增加幅度减小，当目标和背板的温度分别为 30 °C、40 °C 和 50 °C，目标偏振度分别低于无辐射耦合效应时的 63.7%、44.9% 和 42.2%。此外，在远距离红外偏振探测中目标偏振特性会受到大气等自然环境的影响，由于本文研究中没有考虑这一因素，将会在下一步研究中进行修正。本文研究对小探测角情况下的目标偏振探测和识别具有一定的指导意义。

参考文献：

[1] 段锦, 付强, 莫春和, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(上)[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 190-195.
DUAN J, FU Q, MO CH H, *et al*.. Review of polarization imaging technology for international military application I[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(3): 190-195. (in Chinese)

[2] HIOKI S, RIEDI J, DJELLALI M S. A study of polarimetric error induced by satellite motion: application to the 3MI and similar sensors[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(3): 1801-1816.

[3] LI S Y, JIAO J N, WANG CH. Research on polarized multi-spectral system and fusion algorithm for remote sensing of vegetation status at night[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3510.

[4] ZHOU Y, LU Y CH, SHEN Y F, *et al*.. Polarized remote inversion of the refractive index of marine spilled oil from PARASOL images under Sunglint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(4): 2710-2719.

[5] 金伟其, 王霞, 曹峰梅, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(下)[J]. 红外技术, 2011, 33(3): 125-132.
JIN W Q, WANG X, CAO F M, *et al*.. Review of underwater Opto-electrical imaging technology and equipment (Ⅱ)[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(3): 125-132. (in Chinese)

[6] ZHANG J H, ZHANG Y, SHI ZH G. Enhancement of dim targets in a sea background based on long-wave infrared polarisation features[J]. *IET Image Processing*, 2018, 12(11): 2042-2050.

[7] 宫剑, 吕俊伟, 刘亮, 等. 红外偏振图像的舰船目标检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 586-594.
GONG J, LÜ J W, LIU L, *et al*.. Ship target detection based on infrared polarization image[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(2): 586-594. (in Chinese)

[8] 宫剑, 吕俊伟, 刘亮, 等. 红外偏振舰船目标自适应尺度局部对比度检测[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(1): 223-233.
GONG J, LÜ J W, LIU L, *et al*.. Adaptive scale local contrast detection for infrared polarization ship targets[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 223-233. (in Chinese)

[9] 张弛, 吴鑫, 谢建. 基于双向反射分布函数的海面红外偏振特性表征模型[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(6): 1303-1313.
ZHANG CH, WU X, XIE J. Infrared polarization characteristics on sea surface based on bidirectional reflection distribution function[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1303-1313. (in Chinese)

[10] 宿德志, 吴世永, 刘亮, 等. 基于海浪谱建模的海面偏振仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1411001.
SU D ZH, WU SH Y, LIU L, *et al*.. Ocean wave spectrum modeling-based sea surface polarization simulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 1411001. (in Chinese)

[11] GURTON K P, DAHMANI R, VIDEEN G. Measured degree of infrared polarization for a variety of thermal emitting surfaces[R]. Adelphi: Army Research Laborary, 2004: 1-19.

[12] GURTON K P, DAHMANI R. Effect of surface roughness and complex indices of refraction on polarized thermal emission[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(26): 5361-5367.

[13] 寻丽娜, 薛模根, 曾献芳, 等. 飞机材料及其伪装涂层的热红外偏振特性研究[J]. 红外技术, 2016, 38(9): 783-787.
XUN L N, XUE M G, ZENG X F, *et al*.. Research of infrared polarization characteristics of aircraft materials and its camouflage coating[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(9): 783-787. (in Chinese)

[14] 谢琛, 王峰. 伪装涂层红外偏振辐射特性实验研究[J]. 红外技术, 2015, 37(10): 890-894.
XIE CH, WANG F. Research on infrared polarization radiation properties experiment of camouflage coating[J].

Infrared Technology, 2015, 37(10): 890-894. (in Chinese)

[15] 王凯, 刘宏, 张修兴. 空间目标热控涂层材料偏振反射特性研究[J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1229003.
WANG K, LIU H, ZHANG X X. Study on polarized reflection characteristics of space object thermal control coatings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12): 1229003. (in Chinese)

[16] FLYNN D S, ALEXANDER C. Polarized surface scattering expressed in terms of a bidirectional reflectance distribution function matrix[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1646-1650.

[17] 徐文斌, 陈伟力, 李军伟, 等. 采用长波红外高光谱偏振技术的目标探测实验[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0504005.
XU W B, CHEN W L, LI J W, *et al*.. Experiment of target detection based on long-wave infrared hyperspectral polarization technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0504005. (in Chinese)

[18] 柳祎, 史浩东, 姜会林, 等. 粗糙目标表面红外偏振特性研究[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 459-471.
LIU Y, SHI H D, JIANG H L, *et al*.. Infrared polarization properties of targets with rough surface[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 459-471. (in Chinese)

[19] 汪震, 洪津, 叶松, 等. 金属表面粗糙度对热红外偏振特性影响研究[J]. 光子学报, 2007, 36(8): 1500-1503.
WANG ZH, HONG J, YE S, *et al*.. Study on effect of metal surface roughness on polarized thermal emission[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(8): 1500-1503. (in Chinese)

[20] 汪方斌, 伊龙, 王峰, 等. 基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1129002.
WANG F B, YI L, WANG F, *et al*.. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surfaces based on diffuse reflection optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1129002. (in Chinese)

[21] 管风, 张晓晖, 韩宏伟. 金属随机粗糙表面的散射光偏振特性的实验研究[J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(6): 101-107.
GUAN F, ZHANG X H, HAN H W. Experimental study of polarization properties of scattering light from metal random rough surfaces[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2020, 32(6): 101-107. (in Chinese)

[22] TYO J S, RATLIFF B M, BOGER J K, *et al*.. The effects of thermal equilibrium and contrast in LWIR Polarimetric images[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15161-15167.

[23] FELTON M, GURTON K P, PEZZANITI J L, *et al*.. Measured comparison of the crossover periods for mid- and long-wave IR (MWIR and LWIR) polarimetric and conventional thermal imagery[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15704-15713.

[24] LIU H ZH, SHI Z L, FENG B. An infrared DoLP computational model considering surrounding irradiance[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 106: 103043.

[25] 杨志勇, 陆高翔, 张志伟, 等. 热辐射环境下目标红外偏振特性分析[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0220001.
YANG ZH Y, LU G X, ZHANG ZH W, *et al*.. Analysis of infrared polarization characteristics of target in thermal radiation environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0220001. (in Chinese)

[26] SU D ZH, LIU L, LIU L SH, *et al*.. An infrared DoLP model considering the radiation coupling effect[J]. *Photonics*, 2021, 8(12): 546.

[27] 倪歆玥, 余书田, 唐玉俊, 等. 海雾中舰船目标的偏振探测能力研究[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(1): 96-101.
NI X Y, YU SH T, TANG Y J, *et al*.. The research on polarimetric detection capability of ship targets in the sea fog[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(1): 96-101. (in Chinese)

[28] 张景华, 张焱, 石志广. 基于长波红外的海面场景偏振特性分析与建模[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(5): 586-594.
ZHANG J H, ZHANG Y, SHI ZH G. Study and modeling of infrared polarization characteristics based on sea scene in long wave band[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(5): 586-594. (in Chinese)

[29] PRIEST R G, GERMER T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurements[C]. Proceedings of the Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors, NIST, 2000: 169-181.

[30] HYDE IV M W, SCHMIDT J D, HAVRILLA M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 22138-22153.

[31] PÉREZ J J G, OSSIKOVSKI R. *Polarized Light and the Mueller Matrix Approach*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016: 107-109.

[32] THILAK V, VOELZ D G, CREUSERE C D. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for

remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30): 7527-7536.

[33] 朱达荣, 冯康康, 汪方斌, 等. 粗糙表面六参量偏振双向反射分布函数模型[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 092901.

ZHU D R, FENG K K, WANG F B, *et al*.. Six-parameter polarized bidirectional reflectance distribution function model for rough surfaces[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 092901. (in Chinese)

[34] 姚竞争, 韩端锋, 郑向阳. 某三体舰船外形雷达隐身性设计[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(7): 62-67.

YAO J ZH, HAN D F, ZHENG X Y. The shape optimal design considering the radar stealthy performance of a trimaran warship[J]. *Ship Science and Technology*, 2011, 33(7): 62-67. (in Chinese)

作者简介：

宿德志(1986—), 男, 内蒙古扎赉特旗人, 硕士, 副教授, 2010 年于国防科学技术大学获得硕士学位, 主要从事红外偏振成像、红外偏振特性等方面的研究。E-mail: sudezhifun@163.com

刘　亮(1981—), 男, 湖北黄石人, 博士, 讲师, 2010 年于国防科学技术大学获得博士学位, 主要从事高能激光技术、光电对抗技术研究。E-mail: liul513@126.com