

海面背景下气动加热目标在轨红外偏振成像 特征预测及仿真分析

解 聪¹, 袁 航^{1,2*}, 柴国贝³, 任 冬⁴, 任家辉¹

- (1. 陕西科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710071;
2. 西安电子科技大学 物理学院, 陕西 西安 710065;
3. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;
4. 中国人民武装警察部队陕西省总队, 陕西 西安 710054)

摘 要: 基于目标红外强度特征的天基光学探测易受海面耀斑干扰, 造成目标探测率低、虚警大等问题, 综合考虑红外辐射及偏振光学信息, 探索复杂海面背景下气动加热目标在轨多维成像特征预测模型, 为天基光学稳健探测提供理论依据。从目标传热特性和偏振特性出发, 结合目标材质及环境光照信息建立气动加热目标偏振发射及 pBRDF 模型; 利用 Landsat8 遥感实测数据反演了海面温度分布, 结合 Cox-Munk 海面 pBRDF 模型及海面自身偏振模型建立海面背景辐射偏振模型; 利用逐次散射法辐射传输模型 (6SV) 计算大气粒子对目标及背景上行偏振辐射传输的影响; 综合考虑天基光学平台物理调制效应, 建立气动加热目标在轨全链路多维光学成像特征预测模型; 仿真分析了不同飞行高度、飞行速度、探测角度下的目标在轨成像特征及可探测性。研究表明: 在 3~5 μm 海面强反方向下, 基于红外偏振信息的探测方法可以更好地抑制海面耀光、凸显目标。

关键词: 天基探测; 红外辐射; 偏振传输; 建模仿真

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240222

0 引 言

传统天基光学探测方法依赖于目标和背景间单一的红外辐射散射特征差异实现目标的早期预警, 但受制于超远距离、复杂环境光照、地球背景杂波、大气传输衰减、红外成像系统衍射、非线性离散采样效应等多种因素的干扰, 基于温度的红外成像技术易造成目标与背景辐射强度差异的混淆。红外偏振探测作为新型探测手段, 比传统红外探测提供多一维度的特征信息。因此, 探索基于目标辐射、偏振多维光学信息耦合的天基光学探测方法, 对天基光学探测性能的提升具有指导意义。

目标及背景在大气上行传输的红外辐射特性差异是提升目标探测性能的一大利器, 许多学者从红外辐射维度探讨了空中目标的天基探测能力, 并取得了

较多研究成果。余书田等人^[1-3]基于目标与背景间的瞬态光谱辐射特性差异, 提出了一种目标全弹道实时动态波段优化探测方法, 优化波段较固定波段相比具有更高的探测效率。寇添等人^[4]提出了一种红外点源目标的多波段复合探测、识别方法, 验证了多波段复合探测能力较单波段有较为明显地提升。杨霄等人^[5-6]系统分析了天基卫星对高速滑翔目标点源的红外探测能力, 研究结果证明中波波段 (3.7~4.8、3.0~5.0 μm) 较长波波段 (7.7~9.5、8.0~12.0 μm) 的探测能力更强。于晓杰等人^[7]针对类 HTV-2 目标采用了一种基于目标与背景对比度确定探测谱段的方法, 优化设计了红外预警卫星的最优探测谱段范围, 结果表明 2.65~2.85 μm 波段下目标与背景对比度较大。目前已经有大量实验证明利用目标与背景间的红外辐射差

收稿日期: 2024-05-20; 修订日期: 2024-08-10

基金项目: 陕西省博士后科研項目 (2023BSHEDZZ161)

作者简介: 解聪, 男, 硕士生, 主要从事光学偏振成像仿真方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 袁航, 女, 讲师, 博士, 主要从事红外目标探测与对抗仿真技术方面的研究。

异可提升空中目标的探测效能,实现低对比度下的目标成像性能增强^[8-10]。同时,也有学者从红外偏振的角度探索目标探测性能的提升研究。李岩松^[11]等人探讨了不同偏振光在海面太阳耀光背景下目标传输特性及规律,表明偏振检测技术对海面太阳耀光有较好的抑制作用。朱德燕等人^[12]针对红外偏振特性、最优探测波段不明的问题,建立了基于天基平台的空中目标红外偏振辐射模型,研究结果表明:将偏振特性结合到强度信息中可有效提高天基系统对海面背景下空中目标的探测与识别性能。陈卫等人^[13]证明通过合理设计偏振方向的双线偏振片成像系统可有效抑制耀光干扰,有利于提高海面耀光背景下的目标检测效果。目前已经有大量实验证明偏振探测手段可提升系统对舰船、空间目标、潜艇波纹的探测效能,实现低对比度下的目标信息提取及目标成像性能增强^[14-16]。上述研究从红外光谱及红外偏振维度探索了复杂背景下目标探测性能提升的可能性,对天基探测系统的波段及偏振角度优选提供了理论依据。但仍存在以下不足:缺乏目标与复杂海面背景间的辐射、偏振耦合特性研究,导致目标偏振辐射特性计算模型的准确度难以保证;且未考虑大气粒子对目标上行辐射偏振传输的影响,难以实现天基光学探测性能的定量评价及系统参数设计的优化指导。

针对上述问题,文中拟开展复杂环境作用下的气动加热目标全链路天基偏振辐射数字信号特征精准预测模型,为天基光学探测系统性能参数的优化提供理论指导,同时为目标识别的智能检测算法提供数据支撑。

1 复杂光照耦合下的气动加热目标上行偏振辐射传输建模

准确把握气动加热目标在复杂地球背景及战场环境综合作用下的上行红外光谱辐射偏振传输特性是预测气动加热目标在轨成像特征的前提,影响目标成像特征的背景杂波包含海面偏振发射辐射、海面对入射太阳光的偏振反射、地球大气中含有大气分子、气溶胶、水滴及冰晶等多种粒子与入射光相互作用后发生吸收效应和散射效应。图 1 为复杂光照耦合下天基红外偏振系统对目标探测示意图。

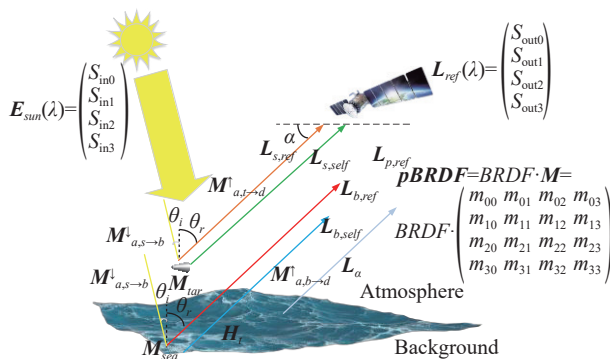


图 1 天基红外偏振系统对目标探测示意图

Fig.1 Target detection diagram of space-based infrared polarization system

1.1 气动加热目标红外偏振辐射特性建模

气动加热目标红外偏振辐射特征受自身辐射及所在复杂环境的影响。在海面背景下,目标表面所反射的光源包括太阳辐射和海面背景辐射。由图 1 可知,复杂光照耦合下的气动加热目标上行偏振辐射包括:目标蒙皮本征偏振辐射、目标蒙皮对入射太阳光的偏振反射。目标蒙皮偏振的红外辐射偏振模型可由斯托克斯矢量形式表示为:

$$L_t^{\uparrow}(\lambda) = \tau_{a,t \rightarrow s}^{\uparrow}(\lambda) M_{a,t \rightarrow s}^{\uparrow} \left[\varepsilon_t^{\uparrow}(\lambda) L_{bb}(T_t, \lambda) + \tau_{a,s \rightarrow t}^{\downarrow}(\lambda) M_{a,s \rightarrow t}^{\downarrow} pBRDF_t E_{sun}^{\downarrow}(\lambda) \right] \quad (1)$$

式中: $L_t(\lambda)$ 为总气动加热目标上行辐射偏振值; λ 为波长; $\tau_{a,t \rightarrow s}^{\uparrow}$ 为目标至探测器上行路径间的大气透过率; $M_{a,t \rightarrow s}^{\uparrow}$ 为目标至探测器上行路径间大气粒子偏振散射穆勒矩阵; ε_t 为目标蒙皮偏振发射率; $L_{bb}(T_t, \lambda)$ 为目标蒙皮温度为 T_s 时的黑体辐射亮度; $\tau_{a,s \rightarrow t}^{\downarrow}$ 为太阳至目标下行路径间的大气透过率; $M_{a,s \rightarrow t}^{\downarrow}$ 为太阳入射辐射至目标下行路径间大气粒子散射偏振穆勒矩阵; $pBRDF_t$ 为目标的偏振双向反射率。

1.1.1 基于 Fluent 的目标蒙皮温度场计算

文中以钝锥型气动加热目标作为研究对象,选择铝合金作为目标的蒙皮材料,粗糙度设定为 0.07,目标表面复折射率为 $n=6.453$ 和 $k=37.36(3 \sim 5 \mu\text{m})$,其长度为 2 m,钝锥体头部半径为 0.175 m,头部圆弧角度为 80° ,锥体底部截面半径为 0.5 m。采用 1976 年美国中纬度地区的标准大气模型作为流场数据参考依据,湍流模型选用 Realizable k -epsilon 湍流计算模型,为确保计算稳定,远场边界条件同自由来流保持一

致,出口边界条件设为无粘超声速出口。综合考虑高速来流与气动加热目标蒙皮之间存在热量交换。设置气动加热目标飞行高度为 25 km,气动加热目标的网格划分如图 2(a) 所示,飞行器速度为 4 Ma 时的目标蒙皮温度场计算结果如图 2(b) 所示。

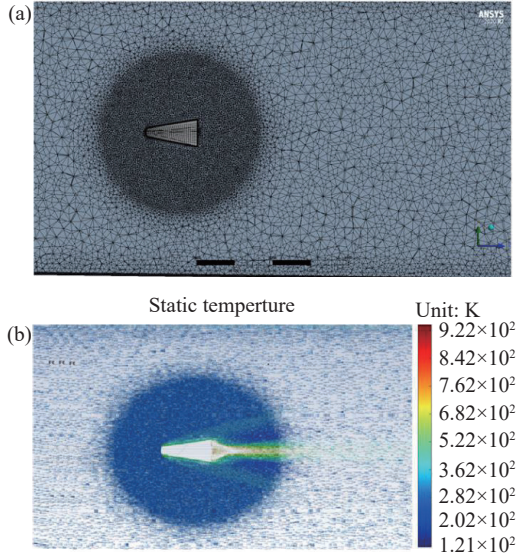


图 2 (a) 气动加热目标网格划分; (b) 25 km 4 Ma 气动加热目标蒙皮温度

Fig.2 (a) Aerodynamic heating target grid division; (b) Aerodynamic heating target skin temperature at 25 km 4 Ma

1.1.2 气动加热目标蒙皮 pBRDF 建模

目标蒙皮粗糙表面可看作一组微元面的集合。漫反射可以看做无偏的朗伯分量,但镜面反射可通过菲涅尔反射因子引入偏振效应。Priest 和 Germer 将 Torrance 和 Sparrow 模型与用于微表面的 Mueller 矩阵相结合,推导出适用于微面元的 pBRDF 的方程^[17]:

$$\text{pBRDF}_t(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \exp\left[\frac{-\tan^2(\theta_N)}{2\sigma^2}\right] \cdot \frac{M_t(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{(8\pi\sigma^2)\cos^4(\theta_N)\cos(\theta_r)\cos(\theta_i)} \quad (2)$$

式中: θ_N 为微元面法线与宏观面法线间的夹角; M_t 为太阳入射光与目标相互耦合作用的散射偏振穆勒矩阵。在该模型中

$$\theta_N = \arccos \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \beta} \quad (3)$$

其中,

$$\cos(2\beta) = \cos(\theta_i)\cos(\theta_r) + \sin(\theta_i)\sin(\theta_r)\cos(\varphi_r - \varphi_i) \quad (4)$$

式中: θ_i 为光线入射天顶角; φ_i 为光线入射方位角; θ_r 为光线反射天顶角; φ_r 为光线反射方位角,引入琼斯矩阵来计算太阳入射光与目标相互耦合作用的散射偏振矩阵^[18]。依据菲涅尔反射定律,某一表面的反射率可以通过垂直反射面和平行反射面两个正交方向的反射系数分量来表示。穆勒矩阵可将入射电场转化为偏振态,即:

$$\begin{bmatrix} E_s^r \\ E_p^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\eta_r) & \sin(\eta_r) \\ -\sin(\eta_r) & \cos(\eta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: r_s 和 r_p 为 s 波和 p 波的反射系数; E_s^r 和 E_p^r 为反射光电场的 s 波和 p 波方向的分量; E_s^i 和 E_p^i 为入射光电场的 s 波和 p 波方向的分量; η_i 和 η_r 由观测几何唯一确定,由下式给出:

$$\cos(\eta_i) = \frac{\frac{\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)}{2 \cos(\beta)} - \cos(\theta_i)\cos(\beta)}{\sin(\theta_i)\sin(\beta)} \quad (6)$$

$$\cos(\eta_r) = \frac{\frac{\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)}{2 \cos(\beta)} - \cos(\theta_r)\cos(\beta)}{\sin(\theta_r)\sin(\beta)} \quad (7)$$

反射系数 r_s 和 r_p 与表面的光学常数有关,即:

$$r_s = \frac{n_i \cos(\theta_i) - n_s \cos(\theta_t)}{n_i \cos(\theta_i) + n_s \cos(\theta_t)} \quad (8)$$

$$r_p = \frac{n_s \cos(\theta_i) - n_i \cos(\theta_t)}{n_i \cos(\theta_i) + n_s \cos(\theta_t)} \quad (9)$$

式中: n_i 为空气的复折射率; n_s 为海水复折射率 ($n+ik$); 其中 n 为海面折射率; k 为海面的消光系数。

公式 (9) 可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_s^r \\ E_p^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ss} & T_{ps} \\ T_{sp} & T_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{bmatrix} \quad (10)$$

维矩阵 T 即为琼斯矩阵,引入琼斯矩阵即可计算 $M_s(\lambda)$ 。

$$m_{00} = \frac{(|T_{ss}|^2 + |T_{ps}|^2 + |T_{sp}|^2 + |T_{pp}|^2)}{2} \quad (11)$$

$$m_{01} = \frac{(|T_{ss}|^2 + |T_{ps}|^2 - |T_{sp}|^2 - |T_{pp}|^2)}{2} \quad (12)$$

$$m_{02} = \frac{(T_{ss}T_{ps}^* + T_{ss}^*T_{ps} + T_{sp}T_{pp}^* + T_{sp}^*T_{pp})}{2} \quad (13)$$

$$m_{03} = \frac{i(T_{ps}T_{ss}^* + T_{ss}^*T_{ps}) + i(T_{pp}T_{sp}^* + T_{sp}^*T_{pp})}{2} \quad (14)$$

$$m_{10} = \frac{(|T_{ss}|^2 - |T_{sp}|^2 + |T_{ps}|^2 - |T_{pp}|^2)}{2} \quad (15)$$

$$m_{11} = \frac{(|T_{ss}|^2 - |T_{sp}|^2 - |T_{ps}|^2 + |T_{pp}|^2)}{2} \quad (16)$$

$$m_{12} = \frac{(T_{ss}T_{ps}^* + T_{ss}^*T_{ps} - T_{sp}T_{pp}^* - T_{sp}^*T_{pp})}{2} \quad (17)$$

$$m_{13} = \frac{i(T_{ps}T_{ss}^* + T_{ss}^*T_{ps}) - i(T_{pp}T_{sp}^* + T_{sp}^*T_{pp})}{2} \quad (18)$$

$$m_{20} = \frac{(T_{ss}T_{sp}^* + T_{ss}^*T_{sp} + T_{ps}T_{pp}^* + T_{ps}^*T_{pp})}{2} \quad (19)$$

$$m_{21} = \frac{(T_{ss}T_{sp}^* + T_{ss}^*T_{sp} - T_{ps}T_{pp}^* - T_{ps}^*T_{pp})}{2} \quad (20)$$

$$m_{22} = \frac{(T_{ss}T_{pp}^* + T_{ss}^*T_{pp} + T_{ps}T_{sp}^* + T_{ps}^*T_{sp})}{2} \quad (21)$$

$$m_{23} = \frac{i(T_{ps}T_{sp}^* - T_{ss}^*T_{ps}) - i(T_{ss}T_{pp}^* - T_{sp}^*T_{pp})}{2} \quad (22)$$

$$m_{30} = \frac{i(T_{ss}T_{sp}^* - T_{ss}^*T_{ps}) + i(T_{ps}T_{pp}^* - T_{sp}^*T_{pp})}{2} \quad (23)$$

$$m_{31} = \frac{i(T_{ss}T_{sp}^* - T_{ss}^*T_{ps}) + i(T_{ps}T_{pp}^* - T_{sp}^*T_{pp})}{2} \quad (24)$$

$$m_{32} = \frac{i(T_{ss}T_{pp}^* - T_{ss}^*T_{ps}) + i(T_{ps}T_{sp}^* - T_{sp}^*T_{pp})}{2} \quad (25)$$

$$m_{33} = \frac{i(T_{ss}T_{pp}^* + T_{ss}^*T_{ps}) + i(T_{ps}T_{sp}^* + T_{sp}^*T_{pp})}{2} \quad (26)$$

式中: *表示复共轭运算, 利用上式即可计算某一表面光学系统的穆勒矩阵, 利用求得的穆勒矩阵和目标 BRDF 即可在入射光斯托克斯矢量已知的情况下求得一束光经过某一表面反射之后的反射光斯托克斯矢量。

1.1.3 目标蒙皮偏振发射率建模

目标的偏振辐射特性不仅与目标的反射及散射特性相关, 还与目标自身的偏振辐射状态相关。由基尔霍夫定律可知物体处于热平衡下发射率等于吸收率。因此, 目标的偏振发射率可根据目标的 pBRDF 计算获得, 即目标蒙皮偏振发射率 ε_i 与理想黑体发射率 ε_{bb} 间的关系可表示为:

$$\varepsilon_i = \left[1 - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \text{pBRDF}_i(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \right] \cdot \varepsilon_{bb} \quad (27)$$

式中: $d\Omega_i$ 为单位立体角。由于黑体在各个方向上发射的辐射均相同, 可以认为其发射率矩阵为 $\varepsilon_{bb} = [1, 0, 0, 0]^T$, 则目标蒙皮的偏振发射率可表示为:

$$\varepsilon_i = \begin{bmatrix} 1 - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \text{pBRDF}_{00} \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \text{pBRDF}_{10} \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \text{pBRDF}_{20} \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \text{pBRDF}_{30} \cos(\theta_i) d\Omega_i \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中: pBRDF_{00} 、 pBRDF_{10} 、 pBRDF_{20} 和 pBRDF_{30} 分别为矩阵 pBRDF_i 中对应的分量。

1.2 海面背景红外偏振辐射特性建模

海面背景在短、中波下对太阳具有强烈的反射散射能力, 在背景强反方向观察时目标时海面耀斑杂波严重影响了目标在轨光学成像质量, 造成天基探测效能下降。为了探索海面杂波偏振辐射对气动加热目标在轨光学探测的影响, 需准确建立海面背景上行红外偏振辐射特性模型。海面背景红外偏振特性包括海面本征偏振辐射及海面对入射太阳光照的偏振反射。探测器接收到的海面上行偏振辐射可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_b^\uparrow(\lambda) &= \tau_{a,b \rightarrow d}^\uparrow(\lambda) \mathbf{M}_{a,b \rightarrow d}^\uparrow [\mathbf{L}_{b,\text{self}}^\uparrow(\lambda) + \mathbf{L}_{b,\text{ref}}^\uparrow(\lambda)] = \\ &\tau_{a,b \rightarrow s}^\uparrow(\lambda) \mathbf{M}_{a,b \rightarrow d}^\uparrow \cdot [\varepsilon_b^\uparrow(\lambda) \mathbf{L}_{bb}(T_b, \lambda) + \\ &\tau_{a,s \rightarrow b}^\downarrow(\lambda) \mathbf{M}_{a,s \rightarrow b}^\downarrow \text{pBRDF}_b^\uparrow E_{\text{sun}} \mathbf{S}_i] \end{aligned} \quad (29)$$

式中: $L_b(\lambda)$ 为总海面上行偏振辐射值; $L_{b,\text{self}}(\lambda)$ 为海面自身偏振辐射值; $L_{b,\text{ref}}(\lambda)$ 为海面反射偏振辐射值; $\tau_{a,b \rightarrow d}^\uparrow$ 为海面至探测器上行路径间的大气透过率; $\mathbf{M}_{a,b \rightarrow d}^\uparrow$ 为海面至探测器上行路径间大气粒子的散射偏振穆勒矩阵; ε_b 为海面背景偏振发射率; T_b 为海面温度; $L_{bb}(\lambda, T)$ 为温度为 T 时的黑体辐射亮度; $\tau_{a,s \rightarrow b}^\downarrow$ 为太阳至海面下行路径间的大气透过率; $\mathbf{M}_{a,s \rightarrow b}^\downarrow$ 为太阳入射辐射至海平面下行路径间大气粒子的散射偏振穆勒矩阵; pBRDF_b 为海面的偏振双向反射率; $\mathbf{S}_i$ 为太阳光入射的斯托克斯矢量, 自然光入射时 $\mathbf{S} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

对于不同的表面, Mueller 矩阵各分量可由琼斯矩阵各分量推出^[19]。同时, 由于斯托克斯矢量是光强的度量, 四个分量均为标量。当不同单色波叠加组成一束光波导致偏振状态发生改变时, 其斯托克斯矢量只需简单求和。

$$S_{tot} = S_a + S_b = \begin{pmatrix} S_{a0} \\ S_{a1} \\ S_{a2} \\ S_{a3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S_{b0} \\ S_{b1} \\ S_{b2} \\ S_{b3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{a0} + S_{b0} \\ S_{a1} + S_{b1} \\ S_{a2} + S_{b2} \\ S_{a3} + S_{b3} \end{pmatrix} \quad (30)$$

1.2.1 海面背景温度场数据获取

为了真实反映海面背景的红外偏振辐射特征,文中利用 Landsat8 遥感卫星热红外遥感影像数据,选取 Landsat8 第 10 波段 (TIRS_B10, 波长为 10.6 ~ 11.2 μm) 数据作为单窗算法的输入,进行海面温度分布反演计算^[18]。

卫星传感器接收到的热红外辐射 L_λ 由三部分组成: 大气向上辐射亮度 L_{up} , 地面的真实辐射亮度经大气层衰减后到达卫星传感器的辐射; 大气向下辐射 L_{down} 到达海面后的反射辐射。辐射传输方程可由下式表示:

$$L_\lambda = \tau(\lambda) [\varepsilon_s L_{bb}(T_s, \lambda) + (1 - \varepsilon_s) L_{down}(\lambda)] + L_{up}(\lambda) \quad (31)$$

式中: τ 为大气在热红外波段的透过率; ε_s 为海面比辐射率; T_s 为海面温度 (K)。海面发射率在热红外波段随波长变化较平缓, 取 $\varepsilon_s = 0.98$ 。 τ , L_{down} 及 L_{up} 可根据卫星过境时研究区的美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 探空数据获得。则 $L_{bb}(T_s)$ 可写为:

$$L_{bb}(T_s) = \frac{[L_\lambda - L_{up} - \tau(1 - \varepsilon) L_{down}]}{\tau \varepsilon} \quad (32)$$

通过辐射亮度—温度转换模型, 即普朗克函数反函数近似式, 求取 T_s :

$$T_s = \frac{K_2}{\ln(1 + K_1/L_{bb}(T_s))} \quad (33)$$

式中: 模型系数 K_1 和 K_2 为卫星发射前预设常量, 可由 Landsat8 TIRS 数据头文件读取, 对于第 10 波段 K_1 和 K_2 的取值分别为 774.89 W/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$) 和 1321.08 K。

选取地点为东经 94.215°、北纬 13.312°, 时间为 2024-01-01T04:03:10 的 Landsat8 TIRS 影像, 过境时间为当地时间 10:18, 地面空间分辨率为 100 m, 云量 0% 进行海面温度反演计算。通过对原始影像进行了裁剪、辐射定标等数据预处理后, 基于上述单窗算法实现海面温度的反演, 反演结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 海面温度分布主要集中在 20 ~ 29 °C 之间, 这一温度区间在所选时间和地点显示出相对均

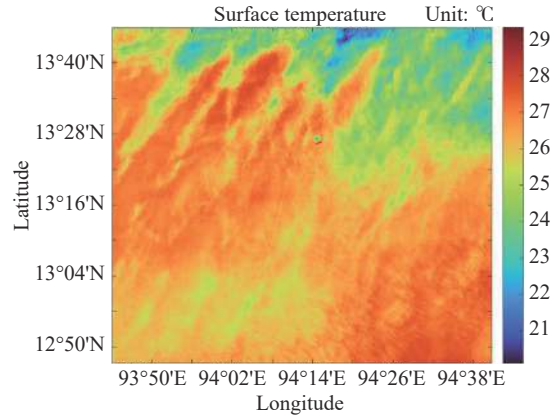


图 3 海面背景温度反演结果

Fig.3 Sea surface temperature inversion results

匀的分布, 突显了该海域在此时段的整体温度水平。

1.2.2 海面 pBRDF 建模

Cox-Munk 海面波谱分布模型综合考虑了风速、风向、遮挡、观测方向等因素对海面红外辐射特性的影响。根据微面元理论, 通过将标量海面 BRDF 函数与 4×4 Mueller 矩阵作用可以得到海面 pBRDF_b:

$$\text{pBRDF}_b(\theta, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} = \frac{\pi P(Z_u, Z_v) \rho(\omega)}{4 \cos \theta_r \cos^4 \beta} M_{sea}^{\dagger}(\lambda) \quad (34)$$

式中: L_r 和 E_i 分别为海面反射辐射亮度和入射辐射照度的矢量形式; M_{sea} 为太阳入射光与海面相互作用的散射偏振穆勒矩阵; $\rho(\omega)$ 为海面反射率; β 为小面元倾斜率; $P(Z_u, Z_v)$ 为海面坡度的概率分布; σ^2_x 和 σ^2_y 分别为迎风 and 侧风方向的均方斜率, 均为风速 U 的函数:

$$P(Z_u, Z_v) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{z_u^2}{2\sigma_x^2} - \frac{z_v^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (35)$$

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = 0.003 + 0.00192U \\ \sigma_y^2 = 0.00316U \end{cases} \quad (36)$$

1.3 大气偏振辐射传输特性建模

地球大气中含有大气分子、气溶胶、水滴及冰晶等多种粒子, 其具有多种形状特征及尺度分布。入射辐射与大气中的各种粒子相互作用发生吸收效应及散射效应。光子与大气分子或非吸收性气溶胶的相互作用后会在入射方向以外的方向重新发射, 基于 Stokes 矢量法的光散射过程可表征为:

$$[I Q U V]^T = \frac{\sigma_s}{4\pi R^2} P(\Theta) [I_0 Q_0 U_0 V_0]^T \quad (37)$$

式中: σ_s 为粒子的散射截面; Θ 为散射角; R 为散射粒子与观测点间的距离; $P(\Theta)$ 为 4×4 散射相矩阵, 散射矩阵中的 16 个非零元素为无量纲量, 其表示光被粒子散射后的能量随散射角的分布, 决定了散射光的偏振状态。为了准确计算大气粒子对入射太阳光的起偏效应、大气粒子对目标与太阳光照作用后的上行辐

射传输的偏振效应, 基于逐次散射法辐射传输模型 (6SV), 通过设置太阳入射角、观测角、大气模式、目标与传感器间的位置等相关参数, 分别计算大气下行至目标表面斯托克斯参量、目标表面至卫星传感器间大气上行斯托克斯参量、大气下行至背景表面的斯托克斯参量、背景至卫星传感器间大气上行斯托克斯参量, 计算流程如图 4 所示。

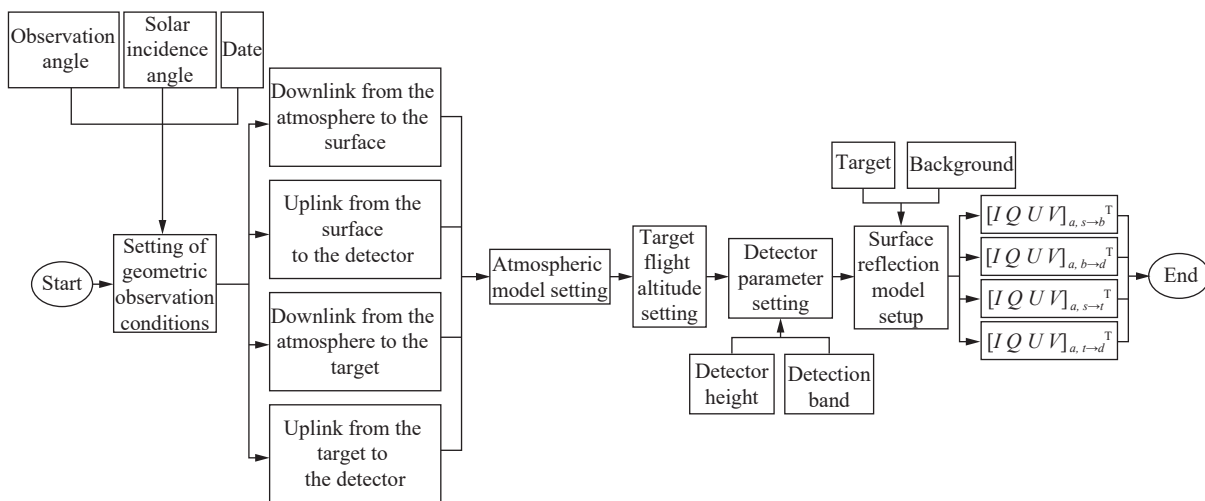


图 4 大气辐射传输偏振计算流程图

Fig.4 Flow chart for calculating the polarization of atmospheric radiative transmission

2 气动加热目标在轨全链路成像效应建模

气动加热目标在轨多维成像特征不仅与目标、背景、环境大气有关, 还与天基多维光电成像系统中的光学组件、探测器组件、光电信息处理组件物理调制效应相关。基于气动加热目标的辐射偏振建模结果, 结合天基同步轨道预警卫星传感器成像效应, 建立气动加热目标-背景-大气-光学系统-探测器-成像电子学电路的全链路辐射偏振成像模型, 实现不同环境条件及系统参数的目标在轨辐射偏振成像特征仿真。

2.1 光学系统物理调制效应建模

根据光的衍射理论, 即使光学系统没有任何像差, 点目标经过该系统成像后会扩散成一个弥散的艾里斑。光学系统的衍射会导致成像质量下降。因此实际成像过程中, 点辐射源在成像系统衍射效应作用下, 将产生一定大小的模糊斑。影响气动加热目标在轨成像特征的关键参数之一为目标衍射斑中心位置

处探测器像元接收到的偏振辐射能量的比例。气动加热目标偏振辐射经光学成像系统时会产生夫朗和费圆孔衍射, 像面中心点的辐射强度可表示为:

$$I' = \tau_o I_t \left[\frac{2J_1(\varphi)}{\varphi} \right]^2 \quad (38)$$

式中: τ_o 为光学系统的透过率; I_t 为目标辐射强度; $J_1(\cdot)$ 为一阶贝塞尔函数; φ 为圆孔边缘与中心点在同一方向上光线的相位差。线偏光通过理想线偏振片的透过率应使用马吕斯定律计算:

$$T = \cos^2 \theta \quad (39)$$

式中: θ 为光偏振方向和线偏振透射轴的夹角。

2.2 探测器物理调制效应建模

考虑探测器的响应率、探测器的光敏面积等对探测器成像信号的影响, 结合点源目标信号响应特性模型, 利用探测器的响应特性转换为电压信号, 探测器的光谱响应可以用描述为:

$$\Delta V_s = G_i \frac{V_n D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \frac{\pi \Delta L A_d}{4 F^2 (1 + M_{\text{optics}})^2} \quad (40)$$

式中: ΔL 为目标与周围背景辐射引起的相对偏振辐射差值; F 为红外预警卫星光学系统 F 数; M_{optics} 为光学系统放大率; $R(\lambda)$ 为探测器在波长 λ 处的响应度; D^* 为比探测率, 表征探测器焦平面的灵敏度; Δf 为噪声等效带宽; V_n 为探测器噪声电压峰值。当衍射效应不可忽略时, 目标产生的信号电压必须按非周期传递函数 (ATF) 修正, 公式 (40) 被修正为:

$$\Delta V_s = R(\lambda) \frac{\tau_o \pi \Delta L A_d}{4 F^2 (1 + M_{\text{optics}})^2} ATF \quad (41)$$

2.3 信号处理电路物理调制效应建模

灰度量化是依据成像传感器的 A/D 转换器位数进行。假设传感器对电压进行线性量化, 则任意输出电压信号对应的灰度级为:

$$Gray = \frac{2^Q - 1}{V_{\max} - V_{\min}} (\Delta V_i) \quad (42)$$

式中: Q 为 A/D 转换器位数; $V_{\min}$ 为变换的电压信号最小值; $V_{\max}$ 为变换的电压信号最大值。

3 仿真结果及分析

基于气动加热目标-海面-环境大气-光学系统-成像探测器多维成像全链路精准预测模型, 仿真分析不同观测角度及飞行高度下气动加热目标多维光学成像特征, 并利用信杂比、对比度、探测概率和清晰度等评价参数实现目标探测性能评估。

1) 信杂比

$$SCR = \frac{\bar{I}_t - \bar{I}_b}{\sigma_b} \quad (43)$$

式中: $\bar{I}_t$ 为目标辐射强度均值; $\bar{I}_b$ 为背景辐射强度均值; σ_b 为目标大小两倍范围内的背景方差。

2) 对比度

$$V = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(i, j) - u]^2} \quad (44)$$

式中: V 为单影像的对比度; m 为影像列数; n 为影像行数; $f(i, j)$ 为影像 i 列点的像素值、 j 行点的像素值; u 为影像平均像素值。对比度表示图像中目标和背景的亮度差异。

3) 探测概率

$$P_{\text{detect}} = \Phi \left[\frac{f_{S_{NR}} - \sqrt{-2 \ln P_{\text{false}}}}{\sigma} \right] \quad (45)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 是正态分布函数; $f_{S_{NR}}$ 为卫星探测时信噪阈值; P_{false} 为虚警率。

4) 清晰度

$$M = \frac{1}{4mn} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{[f(i, j+1) - f(i, j)]^2 + [f(i+1, j) - f(i, j)]^2} \quad (46)$$

式中: M 为单影像的清晰度; m 为影像列数; n 为影像行数; $f(i, j)$ 为影像 i 列点的像素值、 j 行点的像素值。

仿真参数如下: 探测视场 $0.44^\circ \times 0.44^\circ$ 、光学系统等效焦距 1.34 m, 探测器像元尺寸 $30 \mu\text{m}$, 光学系统口径 0.55 m, 光学系统透过率 0.7, 探测波段 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 归一化探测率 $10^{11} \text{W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$, 等效噪声带宽 50 Hz, 太阳入射角 40° , 太阳入射方位角 153° , 探测方位角为 333° 。

3.1 不同探测角度

如图 5 所示, 设置目标飞行高度为 25 km, 飞行速度为 5Ma , 仿真了探测角度分别为 10° 、 40° (太阳强反射方向)、 60° 下的目标在轨成像特征。图中, S_0 表示

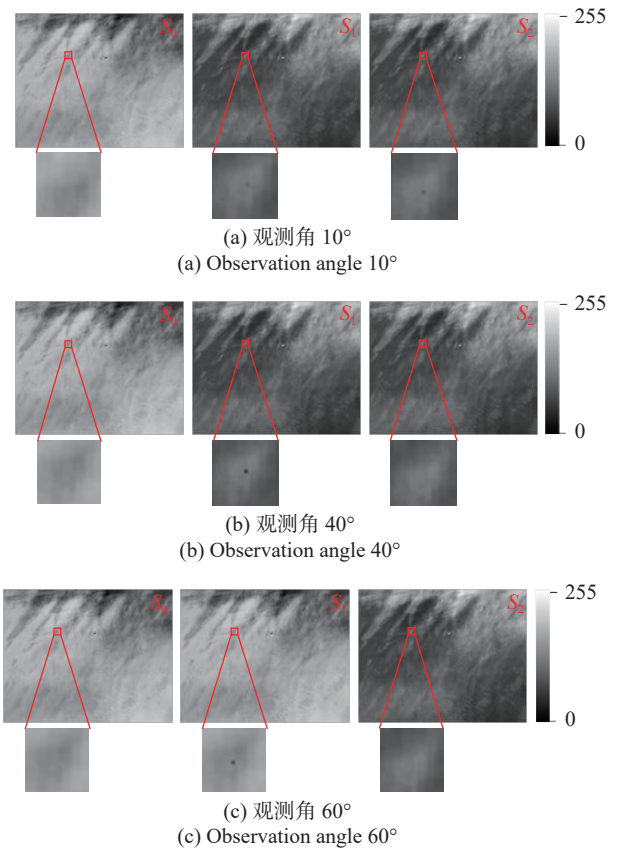


图 5 不同探测角下的目标偏振成像结果

Fig.5 Polarization imaging results of target at different detection angles

光的总强度, S_1 表示水平方向上线偏振光的强度, S_2 表示 45° 方向上线偏振光的强度。

由图 5 可知, 探测角为 10° 时 S_0 成像特征不明显, 但 S_1 和 S_2 分量成像特征更加突出。随着探测角的增加, S_0 和 S_1 信号会有所减小, 但 S_2 信号呈现先减小后增大再减小的变化趋势, 主要原因是当探测角度为 40° 时, 目标表面的强反射现象导致偏振成像特征尤为突出。当探测角为 60° 时, 目标辐射偏振成像特征最弱, 原因在于目标与探测器间的斜程路径较长, 大气透过率显著下降, 目标辐射偏振特征不明显。

为了定性分析不同探测角下的目标探测性能, 计算了不同探测角度下目标仿真结果的信杂比、对比度、探测概率和清晰度。目标成像性能评价结果如表 1 所示。

表 1 不同观测角下的成像评价指标计算结果

Tab.1 Calculation results of imaging evaluation indicators under different observation angles

Imaging evaluation indicators		Observation angle/($^\circ$)		
		10	40	60
SCR	S_0	0.46	0.37	0.35
	S_1	3.48	9.52	7.68
	S_2	4.38	0.61	0.41
Contrast	S_0	15.2	15.2	15.2
	S_1	16.2	18.4	16.9
	S_2	16.6	15.3	15.2
Detection probability	S_0	0.24	0.24	0.23
	S_1	0.38	0.73	0.44
	S_2	0.43	0.25	0.24
Definition	S_0	0.91	0.98	0.90
	S_1	1.41	2.29	2.05
	S_2	1.54	1.01	0.94

由表 1 可知, 非偏状态 (S_0) 和 S_1 的信杂比、探测概率随着探测角度的增加而逐渐下降; S_2 下探测性能在 40° 时最为显著, 其信杂比、对比度、探测概率和清晰度均表现较好。这一现象的主要原因在于当目标处于太阳强反射的环境中时, S_2 下海面背景反射辐射增加量较目标反射辐射小, 海面背景收到一定程度地“抑制”, 目标的可探测性提升。因此, 在海面强反方向, 基于红外偏振信息的探测方法可以更好抑制海面耀光、凸显目标。

3.2 不同飞行高度

如图 6 所示, 设置目标飞行速度为 5 Ma 、探测角度为 40° , 仿真了目标飞行高度分别为 15 km 和 30 km 下的目标在轨成像特征。

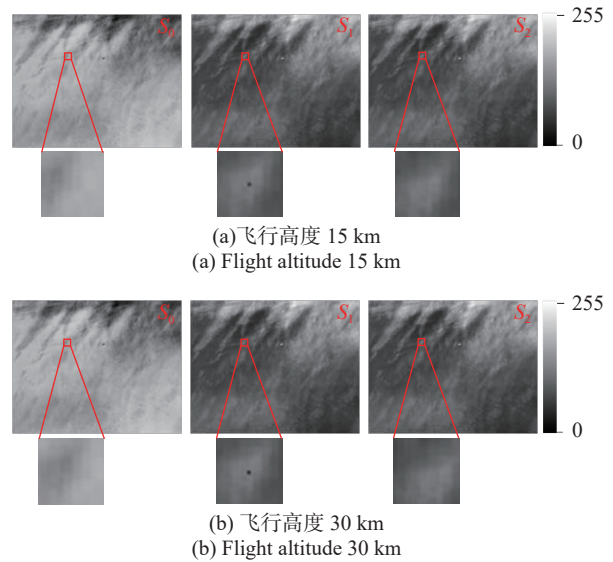


图 6 目标不同飞行高度下的偏振成像结果对比

Fig.6 Comparison of polarization imaging results of targets at different flight altitudes

由图 6 可知, 目标飞行高度为 30 km 时, 目标偏振成像性能最强, 主要原因在于随着目标高度的增大, 目标与红外偏振成像系统间的大气偏振散射效应减小。不同飞行高度下的目标成像性能评价结果如表 2 所示。

表 2 不同飞行高度下成像评价指标计算结果

Tab.2 Calculation results of imaging evaluation indicators under different altitudes

Imaging evaluation indicators		Flight altitude/km		
		15	25	30
SCR	S_0	0.35	0.37	0.40
	S_1	8.50	9.52	11.1
	S_2	0.56	0.61	0.68
Contrast	S_0	15.2	15.2	15.2
	S_1	18.0	18.4	18.8
	S_2	15.26	15.28	15.30
Detection probability	S_0	0.23	0.24	0.24
	S_1	0.67	0.73	0.80
	S_2	0.24	0.25	0.25
Definition	S_0	0.97	0.98	0.99
	S_1	2.14	2.29	2.51
	S_2	1.02	1.01	1.02

由表 2 可知,信杂比、对比度、探测概率和清晰度随着目标飞行高度逐渐增加,特别是在偏振成像下,表现尤为显著。这表明在卫星观测中,飞行高度较高的目标更容易被探测到,其成像特征更加明显,有助于提高目标识别和分析的准确性。因此,采用辐射与偏振信息关联的目标天基光学探测方法能够更好地实现目标的稳健探测。

3.3 目标不同飞行速度

如图 7 所示,设置探测角度为 40° 、目标飞行高度 25 km,仿真了目标飞行速度为 3 Ma 和 4 Ma 下的目标在轨成像特征。

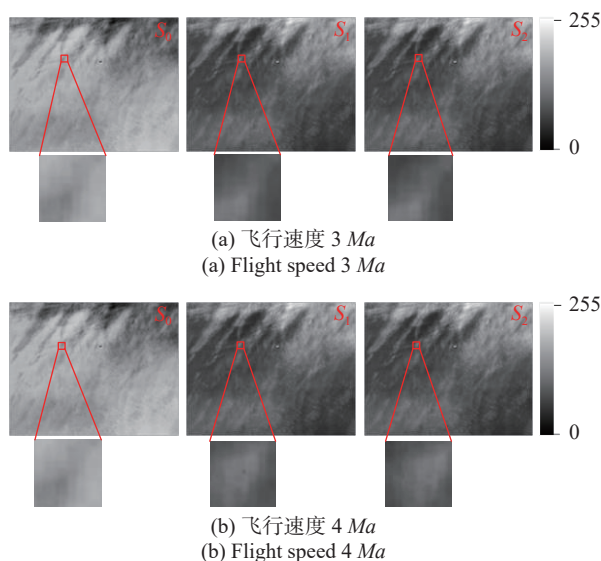


图 7 目标不同飞行速度下的偏振成像结果对比

Fig.7 Comparison of polarization imaging results of targets at different speeds

从图 7 可知,当目标速度为 3 Ma 时, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的偏振成像 (S_0 、 S_1 、 S_2) 中的目标信息均被背景杂波掩盖;当目标速度增加至 4 Ma 时,目标头部蒙皮温度从 589.324 K 升高到 855.51 K,目标自发偏振辐射增强, S_1 仿真图像的目标可探测性较佳。目标不同飞行速度下的成像性能评价结果详见表 3。

由表 3 可知, S_0 、 S_1 和 S_2 仿真图像信背比随着目标飞行速度的增加而增大。 S_0 信背比增加相对平稳,主要原因是海面强反方向具有强烈的散射效应,对目标红外辐射强度成像产生强烈干扰。

表 3 不同飞行速度下成像评价指标计算结果

Tab.3 Calculation results of imaging evaluation indicators under different speeds

Imaging evaluation indicators		Speeds/Ma		
		3	4	5
SCR	S_0	0.24	0.26	0.37
	S_1	0.43	2.07	9.52
	S_2	0.19	0.26	0.61
Contrast	S_0	15.2	15.2	15.2
	S_1	15.2	15.8	18.4
	S_2	15.2	15.2	15.28
Detection probability	S_0	0.23	0.23	0.24
	S_1	0.24	0.31	0.73
	S_2	0.23	0.23	0.25
Definition	S_0	0.97	0.97	0.98
	S_1	0.98	1.21	2.29
	S_2	0.96	0.97	1.01

4 结 论

文中建立了气动加热目标红外辐射-偏振成像特征全链路精确预测模型,仿真分析了不同飞行高度及不同探测角度下的目标在轨红外偏振成像特征及可探测性。研究表明,基于目标与背景间的红外辐射差异在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段难以实现目标探测,然而利用辐射与偏振信息差异则能提升目标的可探测性。信杂比、对比度、探测概率和清晰度等评价指标显示,在海面背景强反方向上,基于红外辐射-偏振多维信息的目标天基光学探测方法较传统红外探测方法对海面耀斑具有较好抑制效果,目标探测性能具有显著提升。当飞行高度较高时,信杂比和探测概率显著提高,进一步证明了偏振成像在复杂背景下的优越性。未来可进一步探索云层对天基目标辐射偏振成像特性的干扰,同时深入探索天基红外偏振光电成像系统对目标辐射偏振传输的物理调制效应,提升天基红外偏振系统辐射传输模型准确度。上述研究结果将对天基多维光电装备的设计和参数优化提供理论指导,并为目标智能检测识别算法的开发提供数据支持。

参考文献:

- [1] YU Shutian, NI Xinyue, LI Xiaoyan, et al. Real-time dynamic optimized band detection method for hypersonic glide vehicle

- [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 121(3): 104020.
- [2] NI Xinyue, YU Shutian, SU Xiaofei, et al. Detection spectrum optimization of stealth aircraft targets from a space-based infrared platform [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(3): 151-160.
- [3] ZHOU Xiaoxuan, NI Xinyue, ZHANG Jingwen, et al. A novel detection performance modular evaluation metric of space-based infrared system [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(5): 274-282.
- [4] KOU Tian, ZHOU Zhongliang, LIU Hongqiang, et al. Multi-band composite detection and recognition of aerial infrared point targets [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 94: 102-109.
- [5] YANG Xiao, NIU Qinglin, HE Zhihong, et al. Analysis of infrared radiation characteristics and detectability of HTV-2-like hypersonic gliding aircrafts [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1204001. (in Chinese)
- [6] NIU Qinglin, YANG Xiao, CHEN Biao, et al. Infrared radiation characteristics and detectability analysis of point source based on high-speed sliding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1104001. (in Chinese)
- [7] YU Xiaojie, ZHENG Yongchao, GUO Chongling, et al. Analysis of infrared detectability hypersonic vehicles under different background [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(5): 627-632. (in Chinese)
- [8] YUAN Hang, WANG Xiaorui, YUAN Ying, et al. Modeling and analysis of aircraft full-chain imaging characteristics in the sea surface and clouds from a space-based platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0204004. (in Chinese)
- [9] YUAN Hang, WANG Xiaorui, YUAN Ying, et al. Space-based full chain multi-spectral imaging features accurate prediction and analysis for aircraft plume under sea/cloud background [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 26027-26043.
- [10] YUAN Hang, WANG Xiaorui, GUO Bingtao, et al. Performance analysis of the infrared imaging system for aircraft plume detection from geostationary orbit [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(7): 1691-1698.
- [11] LI Yansong, ZHAO Huijie, LI Na, et al. Detection of marine targets covered in sun glint based on mid-infrared polarization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1910004. (in Chinese)
- [12] ZHU Deyan, FU Xiaoxuan, TANG Junwei, et al. Simulation and analysis of infrared polarization radiation characteristics of air targets against sea surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 1212006. (in Chinese)
- [13] CHEN Wei, SUN Xiaobing, QIAO Yanli, et al. Polarization detection of marine targets covered in glint [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S117001. (in Chinese)
- [14] WU Hengze, WANG Dacheng, JIN Weiqi, et al. Multiband submarine photoelectric polarization imaging detection simulation study based on water surface characteristics ripple [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20190547. (in Chinese)
- [15] ZHU Deyan, FU Xiaoxuan, TANG Junwei, et al. Mid-wave infrared polarization detection of ship targets for small temperature difference conditions [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(35): 10418-10424.
- [16] ZHAO Huijie, LI Yansong, JIA Guorui, et al. Comparing analysis of multispectral and polarimetric imaging for mid-infrared detection blindness condition [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(24): 6840-6850.
- [17] PRIEST R G, GERNER T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model: Theory and measurements [C]//Proceedings of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors. Infrared Information Analysis Center, 2000, 1: 169-181.
- [18] JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, SOBRINO J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D22): 4688.
- [19] PRIEST P G, RICHARD G. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(5): 988.

Prediction and simulation analysis of infrared polarization imaging characteristics of aerodynamic heating targets in orbit under sea background

XIE Cong¹, YUAN Hang^{1,2*}, CHAI Guobei³, REN Dong⁴, REN Jiahui¹

(1. School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710016, China;

2. School of Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

4. Shaanxi Provincial Corps, Chinese Peoples Armed Police Forces, Xi'an 710054, China)

Abstract:

Objective The early warning of target is realized according to the single difference of infrared radiation scattering characteristics between target and background for traditional space-based optical detection methods. However, due to the interference of many factors such as ultra-long-distance, complex ambient light, earth background clutter, atmospheric transmission attenuation, infrared imaging system diffraction, nonlinear sampling effect, etc., the radiation difference between the target and the background is easy to be confused by the temperature-based infrared imaging technology, which leads to low target detection rate and large false alarm. As a new detection method, infrared polarization detection can provide more target information than traditional infrared detection. Therefore, the exploration of space-based optical detection methods based on multi-dimensional optical information coupling of target radiation and polarization is of great significance to improve the performance of target detection.

Methods The optical information of infrared radiation and polarization is comprehensively considered. A multi-dimensional imaging feature prediction model for aerodynamic heating targets in orbit under complex sea background is explored. The research results will provide theoretical basis for stable and correct space-based detection of aerodynamic heating targets. Based on the heat transfer and polarization characteristics of the target, the polarization emission and pBRDF model of the aerodynamic heating target are established. The radiation polarization model of the aerodynamic heating target skin is established. Based on Landsat8 remote sensing data, the sea surface temperature (SST) is retrieved. The Cox-Munk pBRDF model and self-polarization model of sea surface are combined to establish the sea surface background radiation polarization model. The second simulation of a satellite signal in the solar spectrum - vector (6SV) model is used to calculate the effect of atmospheric particles on the upward polarization radiation transmission of targets. The physical modulation effect of space-based optical platform is comprehensively considered, and the prediction model of full-chain multi-dimensional optical imaging features of aerodynamic heating target in orbit is established. The imaging characteristics and detectability of the target in orbit at different flight altitudes and detection angles are analyzed by simulation.

Results and Discussions The signal-to-clutter ratio (SCR) decreases with the increase of the detection angle at S_0 and S_1 polarization angles. At S_2 polarization angle, the SCR gradually decreases as the detection angle increases from 10° to 30° , and the SCR appears a peak value when the detection angle is 40° . However, the SCR gradually decreases as the detection Angle continues to increase. Meanwhile, the SCR increases gradually with the increase of target flight height at different polarization angles (S_0 , S_1 , S_2). The increase value of the SCR with

the target flight height at S_0 polarization angle is smaller than that at S_1 and S_2 polarization angle(Fig.8). Therefore, the results show that the space-based optical detection method based on infrared polarization information can suppress the sea surface flare and highlight the target in the direction of the strong reflection of the sun incident light from the sea surface in 3-5 μm .

Conclusions In view of the optical detection requirements for wide area continuous surveillance of aerodynamic heating targets, the detection method based on the space based multi-dimensional optical information of the aerodynamic heating target is studied. An accurate prediction model of the optical radiation polarization imaging feature of the full chain including the aerodynamic heating target-the sea surface-the environmental atmosphere-the optical system-the imaging detector is established. The characteristics of radiation polarization at different detection angles, target flight heights and flight speeds are simulated and analyzed. The results show that in the 3-5 μm band, the target is easier to detect under space-based platforms when the radiation and polarization information are used simultaneously. The results of this paper provide data support for the development of intelligent algorithms for realizing the detection, tracking and identification of targets in the geostationary orbit.

Key words: space-based detection; infrared radiation; polarization transmission; modeling and simulation

Funding projects: Shaanxi Province Postdoctoral Science Foundation (2023BSHEDZZ161)