

## 三波段大气传输红外偏振特性对比分析

陈振跃, 王霞, 张明阳, 金伟其

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 偏振成像系统利用目标和背景偏振度上的差异, 有效地提高了人造或伪装目标的探测识别效率。但红外目标的偏振传输是一个复杂的过程, 受大气的影 响较大, 因此, 有必要对不同目标的偏振特性和其影响因素以及大气作用的影响(包括大气吸收、辐射及悬浮粒子散射等)进行研究。进一步推导了红外偏振辐射控制方程; 基于对目标和背景偏振特性的先验知识, 利用大气传输计算软件 MODTRAN 对 3 个典型红外波段的大气吸收及程辐射进行计算; 并对大气传输后的目标辐射偏振度对比度和强度对比度进行仿真。结果表明: 在短波红外波段, 目标的反射成分占主导地位; 在中波红外波段, 目标的自发辐射和反射均不可忽略; 在长波红外波段, 目标的辐射占主导地位, 利用偏振成像效果优于强度成像。结果与理论分析基本一致。研究内容为红外波段目标的探测方式选择提供了参考依据。

**关键词:** 红外偏振成像; 偏振传输; 大气作用; 仿真实验

**中图分类号:** TN219; O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2299-06

## Atmospheric transmission simulation and analysis on the polarization system in three infrared wavebands

Chen Zhenyue, Wang Xia, Zhang Mingyang, Jin Weiqi

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China,  
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Compared with traditional infrared imaging, polarization imaging system can detect and identify the man-made or camouflaged target more effectively by using the differences of the degree of polarization between a target and its background. As the polarization transmission is a complex process, it's necessary to study polarization properties of different objects and atmospheric effects, including atmospheric absorption, atmospheric path radiation and scattering of suspended particles in the atmosphere. In this paper, a general expression of polarized radiation control equation was obtained firstly. Secondly, the atmospheric absorption coefficient and path radiation in NIR, MWIR and LWIR were modeled and calculated respectively by using MODTRAN software. The polarization contrast and intensity contrast between the target and background with increasing detection distance were calculated. The results show that in NIR waveband, the reflection intensity is in a dominant position and that in MWIR both intensity and radiation cannot be ignored. While in LWIR, the radiation is in a dominant position and therefore in

收稿日期: 2013-01-10; 修订日期: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61231014)

作者简介: 陈振跃(1987-), 男, 博士生, 主要研究方向为偏振成像、图像处理。Email: czybit@foxmail.com

导师简介: 王霞(1972-), 女, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电检测、光谱分析及微光与红外成像。

Email: angelniuniu@bit.edu.cn

general polarization imaging has more advantages than intensity imaging. The results are basically consistent with the theoretical analysis. All the work mentioned above provides a reference to the choice of the way in IR detection.

Key words: infrared polarization imaging; polarization transmission; atmospheric effects; simulation experiment

## 0 引言

由菲涅耳反射定律可知,当非偏振光束从光滑介质表面反射时,会产生部分偏振光。另外,根据基尔霍夫理论,热辐射也表现出偏振效应。所以地球表面和大气中的任何目标,在反射和发射电磁辐射的过程中都会产生由它们自身性质和光学基本定律决定的偏振特性,不同物体或同一物体的不同状态(例如物体折射率、粗糙度、含水量、材料的理化特征<sup>[1]</sup>等)会产生不同的偏振状态,且与波长有密切关系,形成偏振光谱。由于大气及地物辐射光谱具有偏振特性,可见光和红外偏振遥感逐步发展成为地基、航空和卫星观测的新技术手段,在对地遥感和天文研究等领域得到了广泛的应用。

红外偏振成像系统在取得偏振信息测量的同时,还能够提供辐射强度的数据。但目标的红外辐射偏振特性及其传输过程比较复杂,如大气的吸收、散射、程辐射等作用以及探测距离都是影响偏振探测的因素。文中通过推导红外偏振辐射控制方程,考虑红外目标的自发辐射特性对探测器接收的辐射量的影响。并且采用辐射传输计算及大气影响校正软件 MODTRAN,分析和计算大气对偏振传输的影响。通过对比不同情况下目标、背景的偏振度对比度和强度对比度随距离的变化曲线,分析偏振度探测与强度探测的优劣。

## 1 红外偏振成像辐射率及辐射控制方程

相对于琼斯矢量用振幅和相位描述完全偏振光的偏振态,斯托克斯矢量  $S$  用 4 个参量来描述光波的偏振态和强度,如下式所示:

$$S=[I,Q,U,V]^T \quad (1)$$

在实际偏振探测中圆偏振分量  $V$  往往很小近于零,因此,线偏振度 DoLP 可表示为:

$$\text{DoLP}=\frac{\sqrt{Q^2+U^2}}{I} \quad (2)$$

通常,光波在反射过程中会产生与物体自身性质密切相关的特征偏振,可以由一个  $4 \times 4$  阶的穆勒矩阵  $M$  来描述。对于线性光学系统,出射光束与入射光束的 4 个斯托克斯参量成线性关系, $M$  表示其变换系数。

双向反射分布函数(BRDF)是对粗糙表面散射特性研究的常用函数,其为目标反射辐射亮度与入射辐射亮度的比值。为表征反射辐射的偏振特性,在 BRDF 中加入偏振元素。一般认为偏振双向反射分布函数(pBRDF)<sup>[2]</sup>包括偏振的镜面反射部分  $f^s$  非偏振的漫反射部分  $f^d$ <sup>[3]</sup>。由于漫反射对总反射辐射能量有贡献,因此漫反射对偏振度也有影响。其中镜面反射部分是将穆勒矩阵  $M$  作用到 BRDF 得到,表达式<sup>[4]</sup>如下:

$$f^s=\frac{1}{2\pi}\frac{1}{4\sigma^2}\frac{1}{\cos^4\theta}\frac{\exp(-\tan^2\theta/2\sigma^2)}{\cos(\theta_i)\cos(\theta_r)}$$

$$G(\theta_i,\theta_r,\Delta\varphi)\cdot M(\theta_i,\theta_r,\varphi_i,\varphi_r,\tilde{n}) \quad (3)$$

式中: $\sigma$  为目标粗糙度; $\theta$  为微面元法向与目标表面法向之间的夹角; $\tilde{n}$  为材料的复折射率; $G(\theta_i,\theta_r,\Delta\varphi)$  为遮蔽因子。由公式(2)得到粗糙表面反射辐射偏振度可表示为:

$$\text{DoLP}=\frac{\sqrt{(f_{10}^s)^2+(f_{20}^s)^2}}{f_{00}^s+f^d} \quad (4)$$

式中: $f_{ij}^s$  的下标数字表示穆勒矩阵的第  $i$  行、第  $j$  列元素应用到镜面反射的结果。

### 1.1 红外偏振辐射发射率模型

辐射发射率定义为:相同温度下目标的辐射亮度与黑体辐射亮度之比。文中将辐射发射率简称为辐射率。温度对于辐射率来说影响较小,可被忽略。若将其延伸到红外偏振来分析,则辐射率的简单通式转换为类似于斯托克斯矩阵的矢量。表示为:

$$L_{\text{obj}}(\lambda,T)=L_{\text{BB}}\cdot\varepsilon(\lambda) \quad (5)$$

上式定义比较模糊,因为辐射率可能是标量或张量,正确的定义应该是黑体辐射为标量形式,辐射率才可能被看作为矢量。所以偏振辐射发射率的定义为:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L_{\text{obj}}(\lambda, T)}{L_{\text{BB}}(\lambda, T)} \quad (6)$$

因为黑体辐射是非偏振的,所以黑体辐射率矢量表示为  $\varepsilon_0=(1,0,0,0)^T$ 。对于非偏振入射,当辐射变为类似于斯托克斯矢量的形式时,pBRDF 变为类似于穆勒矩阵的形式,物体表面其反射辐射可以表示为:

$$dL_r = f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cdot dE_i = f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos(\theta_i) dL_i \quad (7)$$

通常,红外偏振成像接收的辐射包括场景辐射和对其他辐射源的反射,一般辐射物体都是不透明的,所以对于一般物体的热辐射有:

$$\rho(\lambda) + \varepsilon(\lambda) = 1 \quad (8)$$

文中定义半球反射率为:

$$\rho(\theta_r, \varphi_r, \lambda) = \int_{2\pi} f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \quad (9)$$

因此,半球辐射率可以表示为:

$$\varepsilon(\theta_r, \varphi_r, \lambda) = 1 - \rho(\theta_r, \varphi_r, \lambda) = 1 - \int_{2\pi} f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \quad (10)$$

则对于不透明的辐射物体,其表面总辐射亮度可表示为:

$$L_{\text{surf}}^{\text{tot}} = L_{\text{surf}}^e + L_{\text{surf}}^r = L_{\text{BB}} \cdot \varepsilon_{\text{surf}} + \int f_{\text{surf}} \cdot L_i \cos(\theta_i) d\Omega_i \quad (11)$$

为计算目标表面辐射率,引入局部热量动态平衡的概念。首先假设参与辐射和吸收过程的原子和分子数量可以通过其平衡值给出。这种情况下,即使辐射能量不同于其平衡值,材料的分布状态由相同温度下的麦克斯韦-玻耳兹曼分布决定。要清楚一点:假设的平衡是材料的不同状态,而不是材料本身与周围环境的平衡。因为入射辐射是与表面同温度的红外辐射,故总辐射就是相同温度下的黑体辐射。因此有:

$$L_{\text{BB}} \cdot \varepsilon_{\text{BB}} = L_{\text{BB}} \cdot \varepsilon_{\text{surf}} + \int f_{\text{surf}} \times L_{\text{BB}} \cdot \varepsilon_{\text{BB}} \cos(\theta_i) d\Omega_i \quad (12)$$

则可得出红外偏振辐射率的表达式为:

$$\varepsilon_{\text{surf}} = [1 - \int f_{\text{surf}} \cos(\theta_i) d\Omega_i] \cdot \varepsilon_{\text{BB}} = \begin{bmatrix} 1 - \int f_{00} \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{10} \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{20} \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{30} \cos(\theta_i) d\Omega_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 1.2 红外偏振辐射控制方程

不透明目标的表面总辐射亮度如公式(11)所示,不考虑大气影响,入射到偏振片前的斯托克斯矢量(即红外偏振辐射控制方程,目标自发辐射和反射意图如图 1 所示)为:

$$S^{\text{in}} = \int \rho_{\text{pBRDF}} \cos(\theta_i) \cdot S + \varepsilon_{\text{surf}} \cdot I_{\text{obj}} \quad (14)$$

式中:  $S$  为入射斯托克斯矢量,通常情况下认为被动红外成像系统中入射光为自然光,故  $S$  可以表示为:

$S = [I_{\text{bg}}, 0, 0, 0]^T$ 。所以公式(14)变为:

$$S^{\text{in}} = \begin{bmatrix} I_{\text{obj}} + \int f_{00} \cos(\theta_i) d\Omega_i \cdot (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{10} \cos(\theta_i) d\Omega_i \cdot (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{20} \cos(\theta_i) d\Omega_i \cdot (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \int f_{30} \cos(\theta_i) d\Omega_i \cdot (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

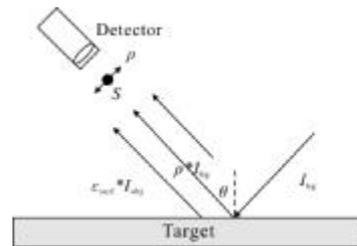


图 1 红外偏振成像辐射模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of IR polarization imaging system

## 2 大气传输对偏振的影响

光束通过大气传输时,大气会影响光束的性质。大气对红外偏振辐射的吸收、散射<sup>[5-6]</sup>、辐射叠加等作用都是需要考虑的因素。大气对辐射的衰减作用,严格来说不能进行精确的理论分析。因为理论分析计算必须知道引起吸收和散射的大气分子的浓度、分布,以及悬浮粒子的含量、尺寸、形状等资料,而大气是不断变化的,很多参数难以精确测定。因此常常用经验公式来计算大气透过率,文中采用 MODTRAN 软件模拟特定条件下的大气透过率和程辐射。大气辐射受大气中水汽及云量的影响较大<sup>[7]</sup>,文中采用 1976 标准大气进行计算,不考虑大气辐射的偏振特性,只计算其对探测总辐射的叠加。

偏振成像系统探测的是大气作用后的目标和背景的反射/自发辐射以及大气自身辐射在某个偏振

方向上的辐射强度。可以将探测到的辐射分解到平行和垂直反射面的两个正交方向  $s$ 、 $p$  上。设入射辐射为  $L_{inc\_sp}$  (其中  $sp$  表示  $s$ 、 $p$  分量), 大气透过率为  $\tau_{atm}$ , 目标自发辐射为  $L_{e\_sp}$  (目标等效为一定温度的黑体与辐射率作用的结果, 不考虑透射, 发射率  $\varepsilon_{sp}$  满足公式 (8),  $\rho_{sp}(\lambda, \theta)$  由 pBRDF 模型给出), 探测器与目标之间大气的程辐射为  $L_{atm}$  (假设非偏振), 则探测器接收到的  $s$ 、 $p$  分量的辐射亮度为:

$$L_{atm} = \tau_{atm} L_{e\_sp} + L_{atm} + \tau_{atm} \rho_{sp} L_{inc\_sp} \quad (16)$$

可得偏振成像系统接收辐射偏振度为:

$$DoLP = \frac{L_s - L_p}{L_s + L_p} \quad (17)$$

若单纯考虑探测器接收的强度信息, 则来自目标和背景的辐射亮度为:

$$L_t = \tau_{atm} L_e + \tau_{atm} \rho L_{inc} + L_{atm} \quad (18)$$

$$L_b = \tau_{atm} L_{bg} + \tau_{atm} \rho_b L_{inc} + L_{atm} \quad (19)$$

因此, 如果探测器直接对强度进行成像, 目标和背景的对比度为:

$$C = \frac{L_t - L_b}{L_t + L_b} \quad (20)$$

### 3 实验仿真及结果分析

#### 3.1 目标及背景辐射参数设定

对仿真条件作如下假设: 目标温度  $80^\circ\text{C}$  (约  $353\text{K}$ ) 铝面, 背景为发射率  $0.95$  的海面<sup>[9]</sup>, 表面温度  $15^\circ\text{C}$ 。入射辐射主要考虑太阳的影响, 探测高度从  $0\text{ km}$  至  $16\text{ km}$ , 探测路径从天空俯瞰海面, 天顶角为  $120^\circ$ , 仿真路径如图 2 所示。

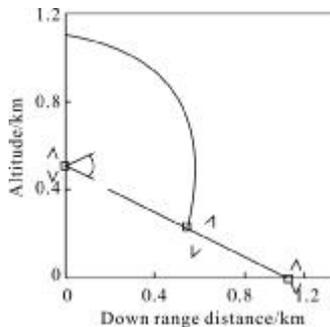


图 2 路径设置

Fig.2 Path setting in simulation

国内外公开发表的文献资料表明, 自然环境中地物背景的红外偏振度非常小 ( $<1.5\%$ ), 只有水体体

现出较强的偏振特性, 其偏振度一般在  $4\% \sim 10\%$ , B. Ben-Dor<sup>[9]</sup>认为平静的海面偏振度较小, 实验仿真中设水面背景的偏振度为  $4\%$ 。

已知入射辐射在不透明金属表面上的反射不仅与入射光线方向和观测角度有关, 也与折射率和金属的吸收比有关。当金属折射率为  $n$ , 吸收比为  $\chi$ , 当入射光与目标表面法线成  $\theta$  角时, 可以通过下式得到平行和垂直于入射面内的反射系数<sup>[8]</sup>:

$$\rho_s = \frac{(n - \cos\theta)^2 + \chi^2}{(n + \cos\theta)^2 + \chi^2}$$

$$\rho_p = \frac{(n - \cos^{-1}\theta)^2 + \chi^2}{(n + \cos^{-1}\theta)^2 + \chi^2} \quad (21)$$

根据资料, 设定目标铝面折射率为  $1.44$ , 吸收比为  $5.23$ , 当入射角为  $75^\circ$  时, 可以得到  $\rho_s = 0.95070$ ,  $\rho_p = 0.59888$ , 由于仿真中铝面温度不变, 不考虑吸收, 由公式 (8) 可以求出对应的发射率  $\varepsilon_s = 0.0493$ ,  $\varepsilon_p = 0.40112$ 。根据 BRDF 模型的定义, 目标表面的反射特性只取决于材料表面本身的特性, 即针对特定材料反射辐射亮度和入射照度的比值具有唯一性, 由铝的折射率、表面粗糙度, 入射光线及观测方位角, 可以求出铝面的双向反射分布函数  $BRDF_s = 0.3026$ ,  $BRDF_p = 0.1906$ 。

#### 3.2 数据仿真

红外成像系统能够获得场景的二维辐射信息, 但是直接仿真二维场景数据量大且没有必要, 这里选取目标和场景中的两点进行仿真。用 MODTRAN 软件计算  $1 \sim 3\ \mu\text{m}$  波段的大气透过率及大气辐射, 由于近些年温室气体增加,  $\text{CO}_2$  密度设置为  $380\text{ ppmv}$ 。根据 3.1 节路径设置, 利用 PcModWin3.7 对不同观测距离的目标和大气辐射亮度进行仿真, 并对太阳在海面辐射照度进行仿真, 得到  $E_{\text{solar}} = 2.2116 \times 10^{-2}\text{ W/m}^2$ , 大气透过率如图 3 所示, 各辐射量曲线如图 4 所示。

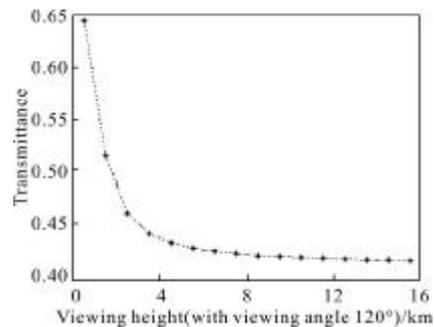


图 3 短波红外波段大气透过率

Fig.3 Atmospheric transmittance in SWIR

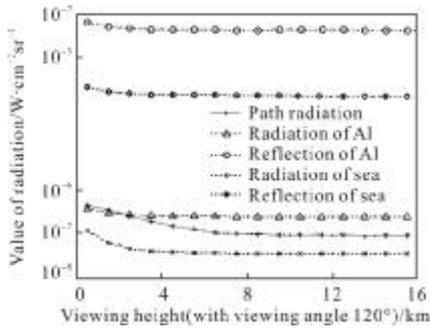


图4 短波红外波段各辐射亮度对比

Fig.4 Radiance between target and background in SWIR

由公式(16)~(20)计算铝面和海洋的偏振度对比度和强度对比度,得到如图5所示的曲线。

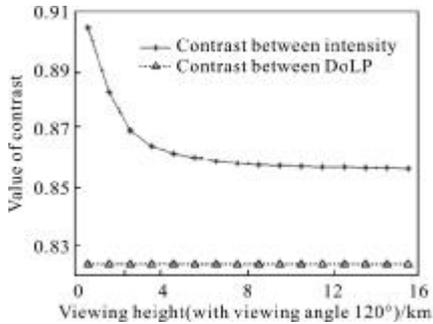


图5 短波红外目标和背景的对比度分析

Fig.5 Polarization/intensity contrast in SWIR

同上,对中波红外波段(3~5 μm)进行仿真,太阳在海面的照度  $E_{solar}=9.7694 \times 10^{-4} W/m^2$ ,大气透过率及各辐射量曲线如图6和7所示。

铝面和海面的偏振度、强度对比度曲线如图8所示。

对长波红外波段(8~14 μm)进行仿真,太阳在海面的照度  $E_{solar}=8.8958 \times 10^{-5} W/m^2$ ,大气透过率及各辐射量如图9和10所示。

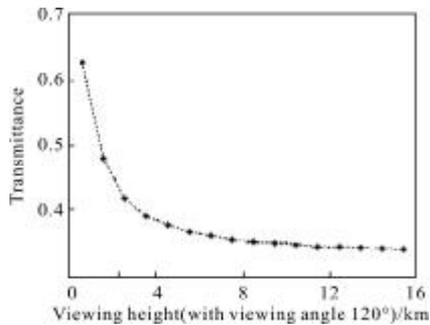


图6 中波红外波段大气透过率

Fig.6 Atmospheric transmittance in MWIR

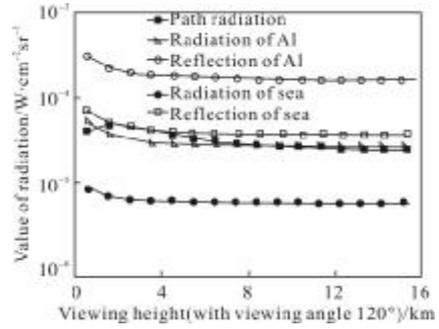


图7 中波红外波段各辐射亮度对比

Fig.7 Radiance between target and background in MWIR

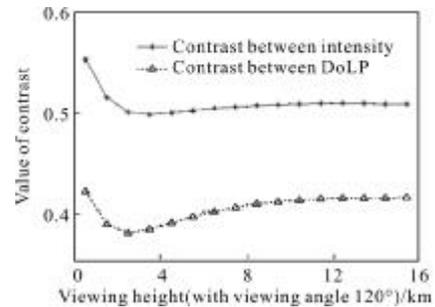


图8 中波红外偏振度对比度与强度对比度

Fig.8 Polarization/intensity contrast in MWIR

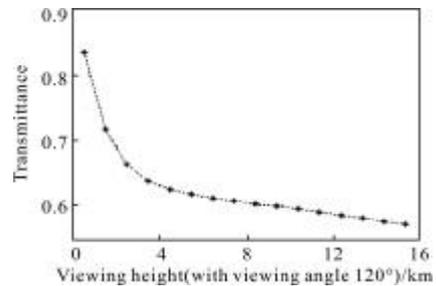


图9 长波红外波段大气透过率

Fig.9 Atmospheric transmittance in LWIR

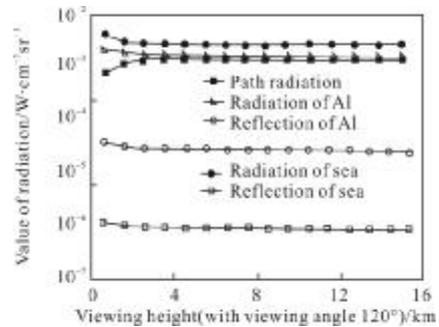


图10 长波红外波段各辐射亮度对比

Fig.10 Radiance between target and background in LWIR

目标和背景的偏振度、强度对比度曲线如图11所示。

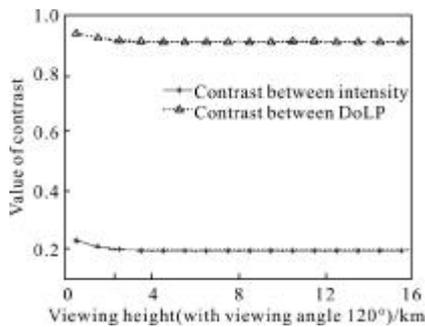


图 11 长波红外偏振度对比度与强度对比度

Fig.11 Polarization/intensity contrast in LWIR

### 3.3 实验分析

对比三个波段内大气透过率曲线(图 3、6、9),可知透过率随探测距离的增大逐渐减小,距离增大到一定程度后透过率保持稳定,长波红外波段大气透过率较其他两个波段大;三个波段内的大气程辐射亮度相差较大,长波红外波段最强,中波次之,短波最弱,其不同波段内大气程辐射变化趋势不同。三个波段内,目标的反射分量所占的比重不同,目标反射在短波红外波段比重最大,中波次之,长波波段几乎可以忽略不计。在仿真中认为大气程辐射为非偏振的,目标的发射以及自发辐射带有偏振特性,由于不同波段上述分量比重不同,因此目标和背景的偏振度对比度和强度对比度随着距离的增大呈现出不同的特性。在短波红外波段,目标、背景的自发辐射及大气程辐射所占比例较小,自然照明条件下,如果目标和背景的反射率差别较大,强度探测性能整体优于偏振度探测;在中波红外波段,目标的自发辐射和大气程辐射均不能忽略,同时受人射辐射的影响较大,因此在中波红外波段目标和背景强度对比度和偏振度对比度较为复杂;长波红外波段探测器接收的辐射中目标自发辐射和大气程辐射亮度所占的比例较大,当目标和背景辐射偏振特性差异较大时,偏振探测较强度探测具有更加稳定和优越的性能。

同时,还应该注意到目标的探测识别性能与多种因素有关,如目标尺寸、目标最小辐亮度、目标背景对比度、探测器性能等。以上分析仅从目标和背景的差异程度考虑,在实际应用中应考虑更多因素。上述计算过程忽略了大气分子及空气中悬浮粒子的退偏作用,事实上单次或多次散射不仅影响探测器接收到的辐射强度,而且改变目标辐

射的偏振特性。

## 4 结论

红外目标的偏振传输是一个复杂的过程,受大气的影响较大。文中推导了红外偏振辐射控制方程,对特定条件下短波、中波以及长波红外波段偏振度和对比度随探测距离的变化关系进行模拟仿真,并分析了偏振度和对比度在目标探测中的性能表现,对目标探测具有一定的理论指导意义。值得注意的是,大气散射的退偏效应也对偏振度有很大影响,因此接下来的研究工作将考虑大气退偏效应对偏振探测的影响。

### 参考文献:

- [1] Liu Biliu, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, et al. Mechanism of infrared polarization detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5):777-781. (in Chinese)
- [2] Gartley M G. Polarimetric modeling of remotely sensed scenes in the thermal infrared [D]. US: Rochester Institute of Technology, 2002.
- [3] Wellem D, Ortega S, Bowers D, et al. Long wave infrared polarimetric model: theory, measurements and parameters[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2006, 8: 1-4.
- [4] Gartley M G, Schott J R, Brown S D. Micro-scale modeling of contaminant effects on surface optical properties[C]//SPIE, 2008, 7086(70860H): 2-3.
- [5] Ugolnikova O S, Postlyakov O V, Maslov I A. Effects of multiple scattering and atmospheric aerosol on the polarization of the twilight sky [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, 88: 233-235.
- [6] Quinby-Hunt M S, Erskine L L, Hunt A J. Polarized light scattering by aerosols in the marine atmospheric boundary layer[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(21): 5168-5170.
- [7] Shaw J A. Degree of linear polarization in spectral radiances from water-viewing infrared radiometers [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3157-3159.
- [8] Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiation Luminosity Chromaticity and Measurements [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [9] Ben-Dor B, Oppenheir U P, Balfour L S. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared [C]// SPIE, 1993, 1971: 68-77.