

海洋气溶胶红外偏振散射特性及校正研究

官 剑, 刘 亮, 何友金, 吕俊伟
(海军航空大学, 山东 烟台 264000)

摘 要: 红外偏振系统探测远距离海面目标时, 海洋气溶胶的散射使得成像质量退化严重, 由于散射作用导致目标与背景难以区分。本文针对气溶胶散射对红外偏振光退偏特性问题, 以气溶胶 Mie 散射模型为基础, 推导得到散射退偏模型。然后, 根据不同气溶胶的粒子谱分布, 在对大气透过率和红外偏振系统同时校正的基础上, 建立散射退偏校正模型, 研究了气溶胶散射对不同尺度因子, 不同散射角和不同散射光矢量的影响。根据对实验图像分析, 在经过本文所提出的经散射校正和红外偏振系统校正后图像的质量有了明显提高, 该方法能够较好的校正大气气溶胶散射对红外偏振光所带来的影响, 更准确反映出目标与背景的偏振特性, 对于红外偏振目标检测与识别具有重要意义。

关键词: 海洋气溶胶; 红外偏振; Mie 散射; 退偏校正模型

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.03.010

Research on polarization scattering characteristics and correction of marine aerosols

GONG Jian, LIU Liang, HE You-jin, LV Jun-wei
(Naval Aeronautical University, Yantai 264000, China)

Abstract: When the infrared polarization system detects a sea marine target through a long distance, the scattering of the ocean aerosol deteriorates the imaging quality seriously, and the scattering of the depolarization causes the target and the background to be indistinguishable. In this paper, based on the aerosol Mie scattering model, the scattering depolarization model is deduced. Then, according to the particle distribution of different aerosols, a correction model of scattering depolarization is established on the foundation of the simultaneous correction of the atmospheric transmittance and the infrared polarization system. Aerosol scattering is studied on the influence of different scale factors, different scattering angles, and different scattering light vector. According to the experimental images, the quality of the images obtained after correcting by the scattering correction and the infrared polarization system proposed in this paper has been significantly improved. The method can better correct the influence of atmospheric aerosol scattering on infrared polarized light, and more accurately reflect the polarization characteristics of the target and the background. Therefore, infrared polarization scattering correction is of great significance for target detection and recognition.

Key words: oceanic aerosol; infrared polarization; Mie scattering; depolarization correction model

1 引 言

红外偏振图像在红外强度成像基础上增加了目

标表面偏振信息的维度(如偏振度、偏振角), 可以表达目标表面状态、材质等丰富的信息, 在目标识

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61205206)资助。

作者简介: 官 剑(1990 -), 男, 博士, 主要从事目标背景红外特性方面的研究工作。E-mail: gongjian0811@outlook.com

收稿日期: 2018-09-25; **修订日期:** 2018-10-18

别^[1-3],遥感^[4],仿生学导航^[5]等领域受到广泛关注。

在自然环境下,利用大气产生的偏振信息可以在偏振导航和大气遥感探测等领域进行研究。然而在目标探测和识别过程中,大气散射作用对偏振信息有较大影响,导致目标与背景差异减小,甚至无法区分目标与背景偏振差异。偏振图像受到大气环境影响无法避免大气环境对偏振图像退化主要表现为散射退偏,经长距离传输偏振光状态发生改变,因此对图像去雾^[6]、大气传输对图像退化^[7]变得十分必要。现阶段对红外偏振光经单一介质散射退偏研究主要有三种方法:(1)将校正前图像中的大气散射偏振特征与目标背景图像分离,最终达到去雾效果。文献[6]、[8]分别采用了该方法对可见光图像进行了去雾校正,但该方法假设目标和背景是低偏甚至无偏的,这对于具有较强偏振特征的海面环境和金属目标等并不适用;(2)通过偏振光大气透过率模型对偏振图像进行校正。杨杰^[9]根据黑体辐射理论和大气透过率模型提出大气有效透过率模型校正偏振参量,有效抑制了大气透过率对偏振光的影响;邹晓风^[10]利用 MODTRAN 软件计算在不同大气条件下计算偏振度与距离变化关系,但文献[9]、[10]并未考虑散射退偏对图像偏振信息产生的影响;(3)蒙特卡洛法模拟偏振光散射过程得到入射光的偏振态,与通常应用于遥感散射研究的倍加累加法,离散纵坐标法不同,蒙特卡洛方法不是对辐射传输方程的直接求解,而是根据传输方程模拟物理过程从而对散射偏振态进行研究。SI HE^[11]根据蒙特卡洛方法模拟海面反射辐射偏振光经大气传输后的偏振态,经校正后得到海面实际偏振态。张倩倩^[12]通过蒙特卡洛方法模拟线偏振光和圆偏振光经多次散射得到的偏振态,得出线偏振光能较好地保持偏振态,圆偏振光可以在短时间内重新恢复自身偏振态。蒙特卡洛方法通过 Stokes 矢量与 Muller 矩阵关系式模拟每一个光子的偏振态最终得到一束光的偏振态,这使得该方法计算精度高,但缺点为较为复杂,实时性较差。

本文针对气溶胶对红外偏振光散射退偏问题,通过对气溶胶 Mie 散射理论推导,根据海洋气溶胶粒子谱分布,利用 MODTRAN 软件对大气透过率进行计算,最终得到简化的红外偏振散射校正模型。根据该模型,通过校正光学系统与大气透过率对红

外偏振图像的影响,最终实现快速有效地校正红外偏振图像。

2 气溶胶红外波段 Mie 散射

2.1 球形气溶胶粒子散射

在计算光散射时,通常考虑散射微粒的无量纲尺度因子 x , 定义为:

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (1)$$

式中, r 为微粒半径; λ 为光的波长。

当尺度因子为 0.002 ~ 0.02 时,可以用 Rayleigh 散射近似散射过程,当尺度因子为 0.2 ~ 50 时,用 Rayleigh 散射计算大气传输过程中的光散射已经不准确了,此时微粒散射表现为 Mie 散射可见光波段,在分析散射的过程中,不仅需要考虑大气分子的 Rayleigh 散射,也要考虑气溶胶粒子、云雾等粒子对光的 Mie 散射^[13]。由于本文基于长波(8 ~ 14 μm)红外偏振系统,在成像过程中大气分子(直径小于 1 nm)远远小于长波红外波长,因此忽略 Rayleigh 散射影响,仅考虑气溶胶和云雾等(直径为 0.001 ~ 10 μm)状况对红外波长产生的 Mie 散射影响。

应用 Stokes 矢量表达入射光和散射光,可以得到如下的关系^[14]:

$$\begin{bmatrix} I^{\text{sca}} \\ Q^{\text{sca}} \\ U^{\text{sca}} \\ V^{\text{sca}} \end{bmatrix} = \frac{\sigma_s}{4\pi R^2} P(\Theta) \begin{bmatrix} I^{\text{inc}} \\ Q^{\text{inc}} \\ U^{\text{inc}} \\ V^{\text{inc}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (3)$$

其中, R 代表散射微粒与观测点间的距离; σ_s 为粒子散射截面; $P(\Theta)$ 表示散射矩阵; Θ 为入射方向与散射方向矢量夹角。假设粒子是随机朝向,旋转对称和独立散射的,可以简化 $P(\Theta)$ 为 6 个独立元素:

$$P(\Theta) = \begin{bmatrix} P_{11}(\Theta) & P_{12}(\Theta) & 0 & 0 \\ P_{12}(\Theta) & P_{22}(\Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\Theta) & P_{34}(\Theta) \\ 0 & 0 & -P_{34}(\Theta) & P_{44}(\Theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

这里考虑的是海洋气溶胶粒子,假设其为球形粒子,则可以再次简化式(4)为 4 个独立元素,其中 $P_{11}(\Theta) = P_{22}(\Theta)$, $P_{33}(\Theta) = P_{44}(\Theta)$ 。

针对单个均匀介质球形粒子,可以推导得到散射矩阵各个元素表达式:

$$P_{11}(\Theta) = \frac{2\pi}{k^2\beta_s}(S_1S_1^* + S_2S_2^*) \quad (5)$$

$$P_{12}(\Theta) = \frac{2\pi}{k^2\beta_s}(S_2S_2^* - S_1S_1^*) \quad (6)$$

$$P_{33}(\Theta) = \frac{2\pi}{k^2\beta_s}(S_2S_1^* + S_1S_2^*) \quad (7)$$

$$P_{34}(\Theta) = \frac{2\pi}{k^2\beta_s}(S_2S_1^* - S_1S_2^*) \quad (8)$$

$$\beta_s = \int_{a_1}^{\alpha} \sigma_s(\alpha) n(\alpha) d\alpha \quad (9)$$

其中, β_s 表示散射系数; $n(\alpha)$ 为气溶胶粒子谱分布函数; S_1 、 S_2 表达式见式(10)和式(11),其中*表示共轭。

$$S_1(\Theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos\Theta) + b_n \tau_n(\cos\Theta)] \quad (10)$$

$$S_2(\Theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \pi_n(\cos\Theta) + a_n \tau_n(\cos\Theta)] \quad (11)$$

定义两个散射角函数:

$$\pi_n(\cos\Theta) = \frac{p_n^1(\cos\Theta)}{\sin\Theta} \quad (12)$$

$$\tau_n(\cos\Theta) = \frac{d}{d\Theta} p_n^1(\cos\Theta) \quad (13)$$

其中, $p_n^1(\cos\Theta)$ 为连带勒让德多项式; S_1 、 S_2 表达式系数 a_n 、 b_n 为米氏函数,表达式定义为^[15]:

$$a_n = \frac{\psi'_n(xm)\psi_n(x) - m\psi_n(xm)\psi'_n(x)}{\psi'_n(xm)\xi_n(x) - m\psi_n(xm)\xi'_n(x)} \quad (14)$$

$$b_n = \frac{m\psi'_n(xm)\psi_n(x) - \psi_n(xm)\psi'_n(x)}{m\psi'_n(xm)\xi_n(x) - \psi_n(xm)\xi'_n(x)} \quad (15)$$

式中, $\psi_n(x)$ 、 $\xi_n(x)$ 为 Riccati-Bessel 函数:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} J_{n+1/2}(x) \quad (16)$$

$$\xi_n(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} H_{n+1/2}^{(2)}(x) \quad (17)$$

式中, $J_{n+1/2}(x)$ 和 $H_{n+1/2}^{(2)}(x)$ 分别为半奇阶的第一类 Bessel 函数和第二类 Hankel 函数。

散射效率 Q_s , 消光效率 Q_e 如式(18)所示:

$$\begin{cases} Q_s = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n a_n^* + b_n b_n^*) \\ Q_e = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \end{cases} \quad (18)$$

根据与散射效率,消光效率,可以得到吸收效率 Q_a ,如式(19)所示:

$$Q_a = Q_e - Q_s \quad (19)$$

根据式(5)~式(8)对单个均匀介质球形粒子散射矩阵的推导,对气溶胶粒子谱分布函数 $n(r)$ 进行积分,可以得到该类型气溶胶在整个粒子尺度的散射矩阵,如式(20)~式(23):

$$P_{11} = \frac{2\pi}{k^2\beta_s} \int_{a_1}^{\alpha_2} (S_1(\alpha)S_1^*(\alpha) + S_2(\alpha)S_2^*(\alpha)) n(\alpha) d\alpha \quad (20)$$

$$P_{12} = \frac{2\pi}{k^2\beta_s} \int_{a_1}^{\alpha_2} (S_2(\alpha)S_2^*(\alpha) - S_1(\alpha)S_1^*(\alpha)) n(\alpha) d\alpha \quad (21)$$

$$P_{33} = \frac{2\pi}{k^2\beta_s} \int_{a_1}^{\alpha_2} (S_2(\alpha)S_1^*(\alpha) + S_1(\alpha)S_2^*(\alpha)) n(\alpha) d\alpha \quad (22)$$

$$P_{34} = \frac{2\pi}{k^2\beta_s} \int_{a_1}^{\alpha_2} (S_2(\alpha)S_1^*(\alpha) - S_1(\alpha)S_2^*(\alpha)) n(\alpha) d\alpha \quad (23)$$

3 红外偏振图像大气传输退偏模型

3.1 大气传输退偏模型

Stokes 矢量^[12]是一个 4×1 的矩阵定义为:

$$S = [I \quad Q \quad U \quad V]^T \quad (24)$$

其中, I 代表辐射强度; Q 代表水平和垂直线性偏振成分; U 代表 $+45^\circ$ 和 -45° 偏振成分; V 代表右旋或左旋偏振成分。任意偏振态可以用着四个斯托克斯参量进行表达。

通常用偏振度 DOP 来描述辐射的偏振特征。偏振度描述的强度与偏振辐射状态的比值,见式(25):

$$\text{DOP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (25)$$

入射光在经过光学元件时,Stokes 矢量有如下关系:

$$S' = M \cdot S = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中, S' 为经过光学元件的 Stokes 矢量; S 为入射 Stokes 矢量; M 为光学元件 Muller 矩阵。可以将式

(2)中的 $\frac{\sigma_s}{4\pi R^2}P(\Theta)$ 作为散射 Muller 矩阵,根据散射 Stokes 矩阵与 Muller 矩阵关系,可以得到入射 Stokes 矩阵表达式,如式(27):

$$\begin{bmatrix} I^{\text{inc}} \\ Q^{\text{inc}} \\ U^{\text{inc}} \\ V^{\text{inc}} \end{bmatrix} = \frac{4\pi R^2}{\sigma_s} P^{-1}(\Theta) \begin{bmatrix} I^{\text{sca}} \\ Q^{\text{sca}} \\ U^{\text{sca}} \\ V^{\text{sca}} \end{bmatrix} \quad (27)$$

其中, $P^{-1}(\Theta)$ 表达式为:

$$P^{-1}(\Theta) = \begin{bmatrix} \frac{P_{11}}{P_{11}^2 - P_{12}^2} & -\frac{P_{12}}{P_{11}^2 - P_{12}^2} & 0 & 0 \\ -\frac{P_{12}}{P_{11}^2 - P_{12}^2} & \frac{P_{11}}{P_{11}^2 - P_{12}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{P_{33}}{P_{33}^2 + P_{34}^2} & -\frac{P_{34}}{P_{33}^2 + P_{34}^2} \\ 0 & 0 & \frac{P_{34}}{P_{33}^2 + P_{34}^2} & \frac{P_{33}}{P_{33}^2 + P_{34}^2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$P^{\text{inc}} = \frac{\sqrt{[P_{33}P_{12}(I^{\text{sca}} - I^{\text{bb}} + \tau_{\text{eff}}I^{\text{bb}}) - P_{33}P_{11}Q^{\text{sca}}]^2 + (P_{11}^2U^{\text{sca}} - P_{12}^2U^{\text{sca}})^2}}{P_{33}[P_{11}(I^{\text{sca}} - I^{\text{bb}} + \tau_{\text{eff}}I^{\text{bb}}) - P_{12}Q^{\text{sca}}]} \quad (31)$$

式中, τ_{eff} 为大气透过率,可根据 MOTRAN 软件得到, I^{bb} 为大气辐射强度,根据普朗克公式得到。

3.2 粒子谱分布^[16]

雾和水云的粒子谱分布一般应用修正的 Γ 分布描述。修正 Γ 分布曲线呈偏态,在半径小的一侧浓度迅速下降,而在半径大的一侧浓度缓慢减小,其函数表达式为

$$n(r) = ar^a \exp(-b \cdot r^\gamma) \quad (32)$$

式中,4个参数 a 、 b 、 α 、 γ 均为正实数; r 为粒子半径,一般情况下,取 $r_{\text{min}} = 0.02 \mu\text{m}$, $r_{\text{max}} = 50 \mu\text{m}$ 。

修正 Γ 分布适用于描述具有单峰分布的粒子谱分布。Deirmendjian 早期提出的几种雾、雨的修正 Γ 分布粒子谱参数见表1,对应的粒子谱分布曲线见图1。Haze M 主要描述海洋或沿海的雾气溶胶分布,Haze L 适用于描述内陆型雾气溶胶分布,Haze H 代表高海拔平流层气溶胶粒子分布。根据不同的天气情况选择不同的粒子谱分布函数,本文主要针对海洋气溶胶的红外偏振退偏性进行研究,这里选择 M 型分布类型。

3 大气传输散射退偏仿真与实验分析

选择表1 Haze M 型代表海洋粒子谱分布,其在波长 $10 \mu\text{m}$ 的折射率为 $m = 1.212 + 0.06i$,尺度因子分布从 0.005 到 4。图2 为散射参数与尺度因子

在自然环境中产生的偏振光通常忽略 Stokes 矩阵中的 V (代表圆偏振分量),即 $V = 0$ 。根据式(2)可以得出 $P_{34} = 0$ 。根据式(25)偏振度的数学表达式,推导得到原始未经散射入射光的偏振度、偏振角表达式不包含 σ_s 、 β_s ,其表达式为:

$$P^{\text{inc}} = \frac{\sqrt{(P_{33}P_{12}I^{\text{sca}} - P_{33}P_{11}Q^{\text{sca}})^2 + (P_{11}^2U^{\text{sca}} - P_{12}^2U^{\text{sca}})^2}}{P_{33}(P_{11}I^{\text{sca}} - P_{12}Q^{\text{sca}})} \quad (29)$$

上述推导仅考虑大气气溶胶散射,未对大气透过率进行校正。根据文献[9]提出的大气传输红外偏振校正,得到校正后的 Stokes 参量:

$$\begin{cases} I^{\text{cor}} = \frac{1}{\tau_{\text{eff}}}I^{\text{sca}} - \frac{1 - \tau_{\text{eff}}}{\tau_{\text{eff}}}I^{\text{bb}} \\ Q^{\text{cor}} = \frac{1}{\tau_{\text{eff}}}Q^{\text{sca}} \\ U^{\text{cor}} = \frac{1}{\tau_{\text{eff}}}U^{\text{sca}} \end{cases} \quad (30)$$

关系图,由图2 可以看出,随着尺度因子的增加,消光效率、散射效率、吸收效率都单调增加,在尺度因子十分小时,可以近似为 Rayleigh 散射。

表1 几种雾、雨的修正 Γ 分布粒子谱参数

Tab.1 Parameters of the haze and rain size-distribution models

Distribution type	a	γ	α	b
Haze M	5.3333×10^4	1/2	1	8.9443
Haze L	4.9757×10^6	1/2	2	15.1186
Haze H	4.0000×10^5	1	2	20.0000
Rain M	5.3333×10^5	1/2	1	8.9443
Rain L	4.9757×10^7	1/2	2	15.1186
Hail H	4.0000×10^4	1	2	20.0000

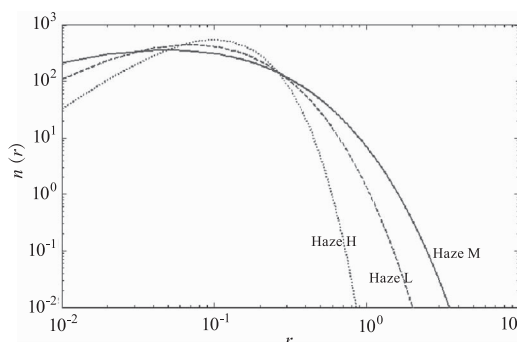


图1 雾的修正 Γ 分布粒子谱

Fig.1 Haze-type distribution functions

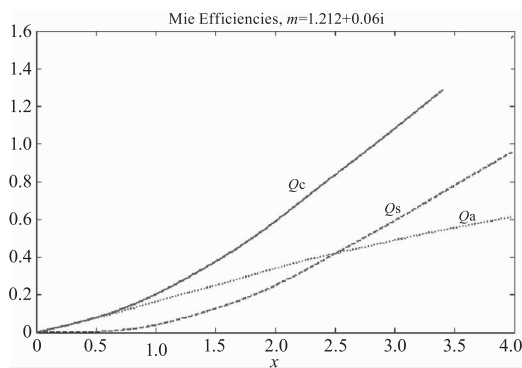


图 2 散射参数与尺度因子关系

Fig. 2 Relationship of the Mie efficiencies and the size parameter

为研究海洋气溶胶对红外偏振退偏影响,分别对偏振光经海洋气溶胶散射后接收到的光进行反演实验。经散射的光的 Stokes 矢量分为两组:一组为 $[10.200]$, $[1-0.200]$, $[100.20]$, $[10-0.20]$; 第二组为 $[10.10.10]$, $[10.1-0.10]$, $[1-0.10.10]$, $[1-0.1-0.10]$ 。第一组散射光矢量偏振度为 0.2, 第二组散射光矢量偏振度为 0.1414。由图 3 可以看出, 散射角较大时, 散射作用明显。其中 $[1-0.200]$ 散射光对应的入射光偏振度与其他三束光趋势不同, 在散射角为 10° 至 40° 时, 其入射光偏振度低于散射光偏振度, 大气散射产生了增加偏振的作用, 而对于同组的其他三束光来讲, 散射带来的都是退偏影响, 对应散射光 $[10.200]$ 的入射光退偏效应最为明显。对于第二组偏振度为 0.1414 的散射光实验如图 4。与第一组散射光相似, 在大散射角条件下, 可以得出散射对偏振光退偏效应较为显著。但对于散射光 $[1-0.10.10]$ 、 $[1-0.1-0.10]$ 所对应的入射光来说, 在散射角为 10° 至 30° 时, 入射光经散射偏振度增加。

根据两组实验可以得到, 入射光经散射作用影响十分明显, 散射影响效果与偏振度大小无关, 而与 Stokes 矢量有关, 偏振度相同但 Stokes 矢量不同的散射光对应的入射光偏振度是不同的。同时, 根据式(28)所得到的校正模型, 散射 Stokes 矢量 U 分量仅受到参数 P_{33} 影响, 而 I 、 Q 分量同时受到 P_{11} 、 P_{12} 的影响。对于 Stokes 矢量 Q 为负的情况下, 在小散射角散射具有增偏效应; 而对于 Stokes 矢量 Q 为非负情况下, 散射具有退偏效应。散射光 Stokes 矢量 U 的符号对于散射影响无关, 其散射在各个散射角都具有退偏效应。应用以上规律及退偏数学模型对经散射的红外偏振图像进行反演, 得出未经散射的校正图像。

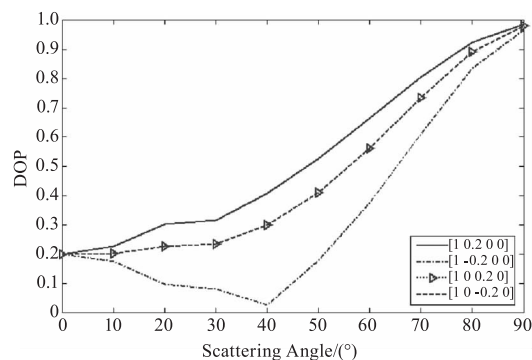


图 3 第一组散射光矢量与散射角关系

Fig. 3 Relationship of the first group scattering light and scattering angle

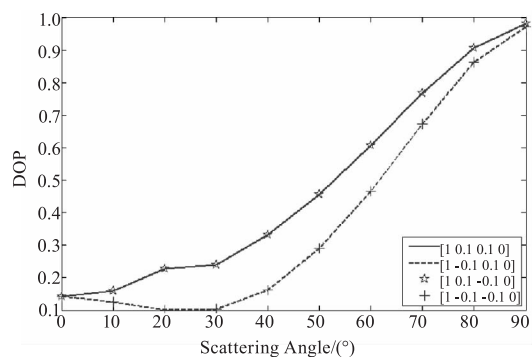


图 4 第二组散射光矢量与散射角关系

Fig. 4 Relationship of the second group scattering light and scattering angle

图 5 为 2017 年 9 月 28 日 18:30 在烟台地区, 应用长波红外偏振 CCD 相机拍摄的图像。采集图像时海面有雾, 气温 15°C , 长波红外偏振相机波长为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$, 图像大小为 640×512 像素。图 5(a)~(d) 分别为四个方向的偏振图像。

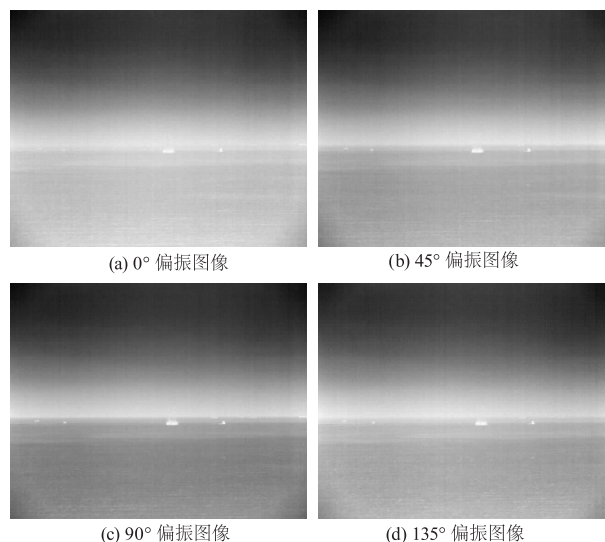


图 5 长波红外偏振图像

Fig. 5 Long wave infrared polarization images

根据式(25)、式(31)可知, 在计算偏振度过程

中需要得知强度图像参数。而在强度图像采集的过程中需要对其配准,且增加操作复杂性,一般将 0° 与 90° 偏振图像叠加近似等于强度图像,但由于偏振系统的偏振片等光学系统辐射影响,直接叠加偏振图像会产生图6(a)所示的过曝图像,这对于计算偏振度是十分不利的,本文采取文献[17]的校正方法,对红外偏振系统中的光学系统进行校正,校正后强度图像如图6(b)。可以看到,校正后图像无过曝现象,可以显示出目标及背景特征。

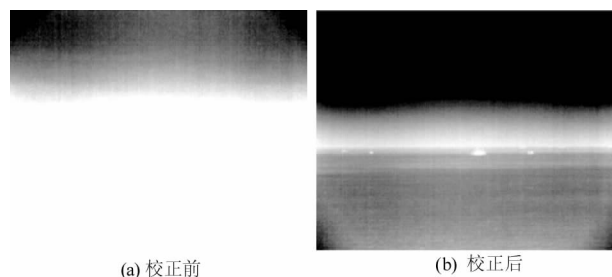


图6 红外辐射强度图像校正前后对比
Fig. 6 Contrast of infrared radiation intensity images before and after correction

根据图5和图6,计算得到校正前图像如图7所示,其中图7(a)为直接计算得到的偏振度图像,图7(b)为采用文献[9]的方法计算得到的偏振度图像,图7(c)为本文提出的方法计算得到的偏振度图像。应用MODTRAN模拟 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段大气透过率,大气环境为中纬度夏季大气,可见距离为10 km,探测距离为4 km,得到 $\tau_{\text{eff}} = 0.8357$ 。

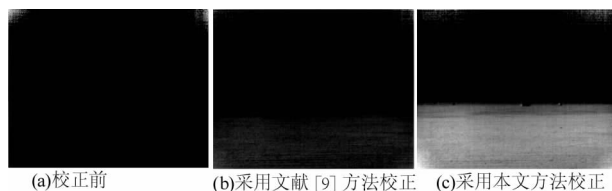


图7 偏振度图像校正前后对比
Fig. 7 Contrast of DOP images before and after correction

如图7(a)所示,由于气溶胶散射影响,直接计算偏振度导致目标背景偏振特性差异较小,区分目标困难。图7(b)应用文献[9]所提出方法计算得到的偏振度图像对偏振信息适当加强,但偏振度依旧较低,导致图像整体灰度值较低。图7(c)采用本文提出的方法,在考虑大气透过率及光学系统影响的同时,对气溶胶散射影响进行校正,得到较为满意的偏振图像。根据校正前后图像直方图比较,如图

8所示。可以看出本文提出的校正方法与校正前及文献[9]方法图像相比,灰度分布更广,提高了偏振图像的对比度。

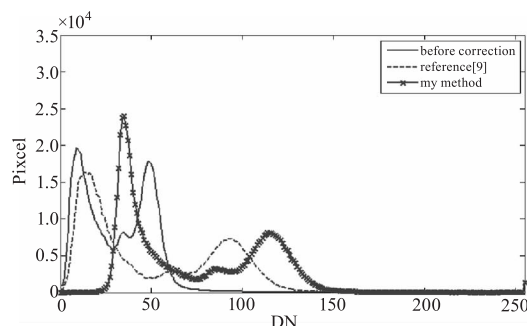


图8 校正前后偏振图像直方图对比

Fig. 8 Contrast of DOP histograms before and after correction

为了定量分析图像质量,选取平均梯度(AVG),边缘强度(EIn),清晰度(FD),信息熵(Entropy),对比度(Contrast)等5项指标作为参考,校正前后图像评价指标如表2所示。根据表2所示的客观评价指标可以看出,本文提出方法的评价指标比校正前和文献[9]方法所得到偏振图像有了较大提高,图像更为清晰,包含更多细节信息。

表2 校正前后图像客观评价指标

Tab. 2 Contrast of image evaluation for intensity image before and after correction

	AVG	EIn	FD	Entropy	Contrast
Before correction	3.4331	31.0266	5.3478	5.9818	88.3880
Reference[9]	4.5891	42.7194	6.3446	6.6182	98.7868
My method	4.8740	43.3987	8.5465	6.8796	125.7714

4 结论

本文根据对Mie散射理论的分析推导,针对海洋气溶胶的粒子谱分布函数,在考虑大气透过率及红外偏振系统辐射影响的条件下,得到了气溶胶散射的红外偏振校正模型。根据校正模型及实验得出,在较小散射角条件下,散射光Stokes矢量 U 分量为负时,大气散射表现为增偏,在较大散射角及 U 分量非负情况下,大气散射表现为退偏。通过对红外偏振校正图像分析可知,本文所提出方法可以有效克服大气气溶胶散射对偏振信息带来的影响,且直接对散射矩阵进行计算,无需对散射过程进行模拟,大大简化计算复杂度,提升计算速度,可以实时对红外偏振大气气溶胶散射进行校正。

参考文献:

- [1] CHEN Weili, WANG Shuhua, JIN Weiqi, et al. Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2014, 33(5): 507–514. (in Chinese)
陈伟力, 王淑华, 金伟其, 等. 基于偏振微面元理论的红外偏振特性研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(5): 507–514.
- [2] ZHANG Chaoyang, CHENG Haifeng, CHEN Zaohui, et al. Polarimetric imaging of camouflage screen in visible and infrared wave band [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 424–427. (in Chinese)
张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 伪装遮障的光学与红外偏振成像 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 424–427.
- [3] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453–5469.
- [4] CHEN Xingfeng, GU Xingfa, CHENG Tianhai, et al. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunglint [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1648–1653. (in Chinese)
陈兴峰, 顾行发, 程天海, 等. 真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射特性仿真与分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1648–1653.
- [5] Lambrinos D, Möller R, Labhart T, et al. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Robotics and Autonomous systems*, 2000, 30(1): 39–64.
- [6] Fang Shuai, Xia Xiushan, Huo Xing, et al. Image dehazing using polarization effects of objects and airlight [J]. *Optics express*, 2014, 22(16): 19523–19537.
- [7] ZHAO Taifei, WANG Chan, KE Xizheng. The study of UV scattering polarization properties of spherical particles of haze [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(3): 665–671. (in Chinese)
赵太飞, 王婵, 柯熙政. 球形雾霾粒子的紫外光散射偏振特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(3): 665–671.
- [8] LIANG Jian, REN Liyong, JU Haijuan, et al. Visibility enhancement of hazy images based on a universal polarimetric imaging method [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(17): 173107.
- [9] YANG Jie, WANG Jiejun, WANG Feng, et al. Error mechanism and calibration of infrared polarization detection in atmospheric transmission [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 252–260. (in Chinese)
杨杰, 汪杰君, 王峰, 等. 大气传输中红外偏振探测误差机理及校正 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 252–260.
- [10] ZOU Xiaofeng, WANG Xia, JIN Weiqi, et al. Atmospheric effects on infrared polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 304–308. (in Chinese)
邹晓风, 王霞, 金伟其, 等. 大气对红外偏振成像系统的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 304–308.
- [11] He Si, Wang Xia, Xia Runqiu, et al. Polarimetric infrared imaging simulation of a synthetic sea surface with Mie scattering [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): B150–B159.
- [12] ZHANG Qianqian, GAO Jun, XU Xiaohong, et al. Analysis of multiple scattering polarization transmission properties [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 190–197. (in Chinese)
张倩倩, 高隼, 徐小红, 等. 多粒子散射的偏振传输特性分析 [J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 190–197.
- [13] RAO Ruizhong. *Modern atmospheric optics* [M]. Beijing: Science Press, 2012: 219–241. (in Chinese)
饶瑞中. *现代大气光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 219–241.
- [14] GU Xingfa, CHENG Tianhai, LI Zhengqiang, et al. *Atmospheric aerosol polarized remote sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 26–42. (in Chinese)
顾行发, 程天海, 李正强, 等. *大气气溶胶遥感* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 26–42.
- [15] Michael I Mishchenko, Larry D Travis, Andrew A Lacis. *Scattering, absorption, and emission of light by small particles* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
Michael I Mishchenko, Larry D Travis, Andrew A Lacis. *微粒的光散射、吸收和发射* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [16] Deirmendjian D. *Electromagnetic scattering on spherical polydispersions* [R]. Rand Corp Santa Monica CA, 1969.
- [17] Li S, Jin W, Xia R, et al. Radiation correction method for infrared polarization imaging system with front-mounted polarizer [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26414–26430.