

文章编号 1004-924X(2017)08-2233-11

偏振场景目标探测的建模与仿真

李 岩¹, 张伟杰^{1,2*}, 陈嘉玉^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对用光学遥感技术探测复杂场景下的目标时, 真实环境下的目标、背景反射以及大气气溶胶辐射之间具有相当大的互干扰性, 本文研究了偏振场景目标的建模与仿真技术。介绍了偏振场景仿真的光学理论与偏振模型基础, 对 Priest-Germer 模型进行了数值仿真与分析。基于 Priest-Germer 模型, 开发了偏振视景目标探测仿真软件, 给出仿真软件的设计思想和软件框架。介绍了偏振双向分布反射函数模型, 给出其偏振形式的 Stokes 表达式并进行数值仿真分析。给出了两种目标模型分别赋予两种不同表面材质时在 440nm 和 600nm 波长辐照条件下的 4 组偏振仿真实验及偏振图像的灰度直方图, 并进行比较和分析, 结果表明: 基于 Priest-Germer 模型的偏振仿真软件对目标、辐照波长、材质具有较高的敏感性, 能够提供较好的分辨和识别能力。

关键词: 光学遥感; 偏振成像; 二向反射分布函数; Priest-Germer 模型; 仿真

中图分类号: TP722; TP391.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172508.2233

Modeling and simulation for target detection in polarization scene

LI Yan¹, ZHANG Wei-jie^{1,2*}, CHENJia-Yu^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhangweijie15@mails.ucas.ac.cn*

Abstract: There is complex mutual interference among targets, background reflection and aerosol radiation under a real environment when optical remote sensing technology is used to detect targets in complex scene. This paper explores the technology of modeling and simulation for targets in a polarization scene. The optical theories and polarization model basis were introduced, and numerical simulation and analysis for Priest-Germer model were implemented. The simulation software for the detection of targets in the polarization scene was developed and the design idea and frame of the software were given. Then, the model for Polarization Bidirectional Reflectance Distribution Function was introduced, and its Stokes expression was given and analyzed in numerical simulation. Four groups of polarization simulation experiments and gray level histograms of polarization images under wavelength irradiation conditions of 440 nm and 600 nm for two different surface materials were given respectively

收稿日期: 2016-12-26; 修订日期: 2017-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 61308085)

for two given target models, and a comparative experiment was analyzed. The experiment results indicate that polarization simulation software based on Priest-Germer model is sensitive to different targets, irradiation wavelengths and materials, and provides better resolution and identification ability.

Key words: optical remote sensing; polarimetric imaging; bidirectional reflection distribution function; Priest-Germer model; simulation

1 引言

偏振成像是一种新兴的探测识别技术^[1],其利用了目标散射辐射的偏振基本属性信息(偏振度、偏振角等),即使两个物体探测点之间没有温差也能够通过偏振对比度成像,因而能够反映出传统红外探测技术所不能探测到的目标景物信息。

偏振遥感探测应用中,景物目标的相互作用能够影响目标表面反射或辐射的电磁波的偏振状态,具有突出目标轮廓和细节的能力,故在农业遥感、隐身及反隐身等民用、军事领域备受关注^[2]。早在 2002 年,国外就开始对偏振仿真进行研究,主要集中在基于双向分布反射函数模型(BRDF)的仿真及实验测试方面。美国罗切斯特大学已经开发出了用于偏振特性分析的 DIRSIG 软件。国内部分研究院所开展了对目标特性研究的分析工作,但还处于对目标和背景基础材质偏振双向反射分布函数(Polarization Bidirectional Reflectance Distribution Function)模型的研究阶段,尚无涉及偏振视景仿真软件的开发。

本文基于 PG 散射模型,利用半球空域辐照数据和目标材质物理特性数据开发了偏振视景目标探测仿真软件。介绍了偏振双向分布反射函数模型,给出其偏振形式的 Stokes 表达式并进行数值仿真分析。最后,通过 VS2013 开发平台对两类目标模型、两个波长半球空域偏振光辐照分布、两种材质条件下目标模型的散射光偏振信息进行可视化仿真并分析总结,并对偏振探测视景仿真技术进行综合分析,指出了该技术的未来发展方向。

2 光的偏振态及其数学表示

光波是横波,偏振是其基本属性之一。光在传播过程中,存在无穷多个与传播方向垂直的振

动方向,波动传播过程中朝着与传播方向相垂直的不同方向振荡的特点称为偏振^[3]。自然光可以看作是具有一切可能振动方向的许多光波的总和,其通常可认为无偏振状态。

一般情况下,可以使用琼斯矢量或斯托克斯矢量方法^[3-4]来描述光的偏振状态。除了完全偏振光,斯托克斯矢量还可以用来描述部分、完全非偏振光,其定义式表示如下:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \\ \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{90} \\ \mathbf{E}_0 - \mathbf{E}_{90} \\ \mathbf{E}_{45} - \mathbf{E}_{-45} \\ \mathbf{E}_{\text{RCP}} - \mathbf{E}_{\text{LCP}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

上式中 \mathbf{E}_0 ($\theta=0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ$) 为将偏振片旋转 θ 角度后的热图像, $\mathbf{E}_{\text{RCP}}, \mathbf{E}_{\text{LCP}}$ 分别表示右旋和左旋圆偏振信息。

斯托克斯矢量能够表达光束的偏振态信息,但在描述目标景物的辐射、反射偏振态变化及表达目标表面状态与其固有属性关系方面能力不足^[5]。目前常用的表征目标景物表面状态与固有属性特征的两个重要参量是偏振度(Degree of Polarization, DoP)和偏振角(Angle of Polarization, AoP)。通过偏振度可以将一束光表示成完全偏振光和非偏振光的组合,如下式:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \text{DoP} \cdot \mathbf{S}_0 \\ \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \\ \mathbf{S}_3 \end{bmatrix} + (1 - \text{DoP}) \begin{bmatrix} \mathbf{S}_0 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中,利用光束的斯托克斯参量偏振度计算如下式:

$$\text{DoP} = \frac{\sqrt{\mathbf{S}_1^2 + \mathbf{S}_2^2 + \mathbf{S}_3^2}}{\mathbf{S}_0}, \quad (3)$$

线性偏振度如下:

$$\text{DoLP} = \frac{\sqrt{\mathbf{S}_1^2 + \mathbf{S}_2^2}}{\mathbf{S}_0}. \quad (4)$$

在实际的大量遥感目标红外探测应用中,通常目标反射的光束中左旋、右旋的偏振光成分十分微弱,可以忽略不计,因此得到下式:

$$DoP \approx DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (5)$$

偏振角表征光束的偏振方向相对于 x 轴的夹角,对于部分偏振光,表示的是能量最大的偏振方向与 x 轴的夹角,计算公式如下:

$$AoP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \quad (6)$$

3 偏振模型算法

目标的粗糙材料表面对入射辐射通量的反射和材料内部对于透射辐射的散射是构成辐射反射的两个机制,这会使材料的反射系数具有强烈的角度依赖性,因此需引入双向反射分布函数(BRDF)来描述方向性反射系数。该函数能够比较全面地反映目标表面对光波的作用情况,且便于进行差异规律比较研究,在光学遥感领域里,双向反射分布函数是应用最为广泛的度量模型。此外,材质表面的反射特性还依赖于表面纹理、粗糙度等因素,双向反射分布函数能够较形式化、精确化地逼近真实材质物理特性。

3.1 BRDF 模型

双向反射分布函数模型^[5](BRDF)是由 Nicodemus 在 19 世纪 70 年代提出的。该模型始于光辐射角度定义并得到了极大的发展,现在已经广泛应用到激光、红外和微波段的散射、辐射应用领域中,并更深地延拓到遥感领域。双向反射分布函数表征的是光学的基本特性,对于某个入射方向的光,模型代表在上半球空间反射能量的分布状态。其数学表达式如下:

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)}, \quad (7)$$

其中, θ 表示模型中的天顶角, φ 表示模型中的方位角, λ 表示光波长。图 1 展示了二向反射分布函数测量模型及参数。

由于物体粗糙表面的不规则性,为了在计算机上对粗糙表面的光照反射偏振特性进行仿真,还需要引入微面元模型^[3],在不考虑光线在表面的多次反射情况下,将粗糙表面分解为一系列微小面元,在测量坐标系下,根据入射光源、探测器、微小面元的位置关系应用 pBRDF 模型进行仿真计算。图 2 为粗糙表面微面元模型的角度参数及相互关系。其中虚线 Z 为粗糙表面的平均法线,

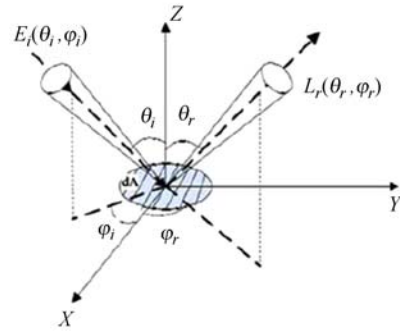


图 1 二向反射分布函数模型及参数

Fig. 1 Bidirectional reflectance distribution model and parameters

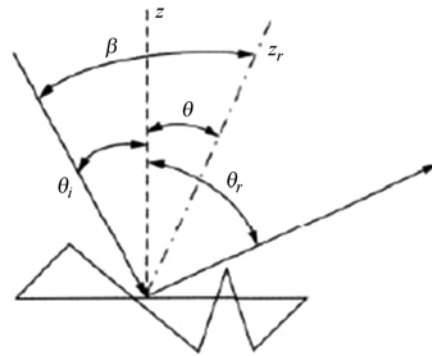


图 2 粗糙表面微面元模型

Fig. 2 Micro surface model of rough surfaces

Z_n 为微面元的法线方向, β 为入射光线与微面元法线的夹角, θ 为表面平均法线和微面元法线的夹角。根据图 1 和图 2 的角度关系, β 和 θ 可由如下公式计算得到:

$$\cos(2\beta) = \cos(\theta_i)\cos(\theta_r) + \sin(\theta_i)\sin(\theta_r)\cos(\phi_r - \phi_i), \quad (8)$$

$$\theta = \arccos\left[\frac{\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)}{2\cos(\beta)}\right]. \quad (9)$$

目前,国内外在光学遥感领域中,广泛使用的 BRDF 模型主要有三种,分别是: Torrance-Sparrow BRDF, Beard-Maxwell BRDF 以及 Priest-Germer BRDF,前两种模型主要考虑了材质表面的材质物理特性、纹理粗糙度等因素,而 PG 模型基于前两种模型引入了穆勒矩阵来表示材质表面的菲涅尔散射效果,能够表征散射光的斯托克斯矢量。因而本文主要介绍最后一种,并针对此模型进行红外偏振场景仿真。

3.2 PG 模型

PG(Priest-Gerber)模型^[6-7]经验模型,粗糙表面材质反射采用菲涅尔反射理论模型,反射能量在上半球分布采用基于统计学的经验模型,它是 Torrance-Sparrw BRDF 和 Beard-Maxwell BRDF 的扩展,能够度量、模拟光线在材质表面反射后的偏振状态变化,模型本身是双向反射分布函数的偏振形式(polarized BRDF)。此外,DIRSIG(美国罗彻斯特大学开发的数字及遥感图像仿真软件)也使用 PG 模型作为核心模型,在国防工程、工业应用领域中具有较大的理论实践价值。

PG 模型反射计算通常包括具有偏振特性的镜面反射、非偏振的体散射和漫散射三个部分,实际中体散射也会对反射光的整体偏振状态产生很小的影响,PG 模型中将体散射处理为完全非偏振信息。模型的反射计算一般形式如下式:

$$f_{\text{pBRDF}} = f_{\text{spec}} + f_{\text{vol}} = f_{\text{polarized}} + f_{\text{unpolarized}}, \quad (10)$$

$$f_{\text{spec}} = \frac{M(\beta, n, k) \text{SO}(\theta, \beta, \tau, \Omega) P_{\text{GIC}}(\theta, \sigma, B)}{4 \cos(\theta_i) \cos(\theta_r)}, \quad (11)$$

$$f_{\text{vol}} = \rho_u + \frac{2\rho_v}{\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)}. \quad (12)$$

模型中镜面反射部分计算主要基于菲涅尔反射矩阵函数的统计分布,此外,PG 模型中还引入了阴影与遮挡函数,进一步逼近了真实的光照反射情况。

镜面反射计算部分改变反射光线偏振状态的因素主要是一个 4×4 的穆勒矩阵^[5-6],PG 模型主要利用 p 波和 s 波的反射系数和相位延迟角计算导体的穆勒矩阵,得到如下矩阵形式:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_s^2 + r_p^2 & r_s^2 - r_p^2 & 0 & 0 \\ r_s^2 - r_p^2 & r_s^2 + r_p^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2r_s r_p \cos \Delta & -2r_s r_p \sin \Delta \\ 0 & 0 & 2r_s r_p \sin \Delta & 2r_s r_p \cos \Delta \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 r_s 和 r_p 分别是 s 波和 p 波的反射系数, Δ 是相位延迟角,根据菲涅尔定律相关参数有如下计算关系

$$r_s = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}, \quad (14)$$

$$r_p = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}, \quad (15)$$

$$\Delta = \varphi_s - \varphi_p, \quad (16)$$

$$\sin(\theta_t) = (n + ik) \sin(\theta_i). \quad (17)$$

由于在真实的仿真环境中,我们所遇到的粗糙材质表面都不是理想平滑的,因此 PG 模型引入了微小面元概率分布函数 $P_{\text{GIC}}(\theta, \sigma, B)$,该函数的基本思想是利用微面元法线与材质平均法线的夹角来表征反射光线强度与材质表面微面元坡度的关系。常用的分布函数形式有高斯分布和柯西分布^[8],如下式:

$$P_G(\theta, \sigma, B) = \frac{B \exp\left[-\frac{\tan(\theta)^2}{2\sigma^2}\right]}{2\pi\sigma^2 \cos(\theta)^3}, \quad (18)$$

$$P_C(\theta, \sigma, B) = \frac{B}{\cos(\theta)(\sigma^2 + \tan(\theta)^2)}, \quad (19)$$

式中参数 B 表征微面元法线分布偏差, σ 表征粗糙表面特定区域微面元坡度的均方差。

为了进一步逼近真实情况,PG 模型中引入了阴影与遮挡函数 $\text{SO}(\theta, \beta, \tau, \Omega)$,该函数主要是模拟粗糙材质表面对反射光的阴影与遮挡效应^[8]。图 3 和图 4 显示粗糙材质对光线的阴影与遮蔽效果。

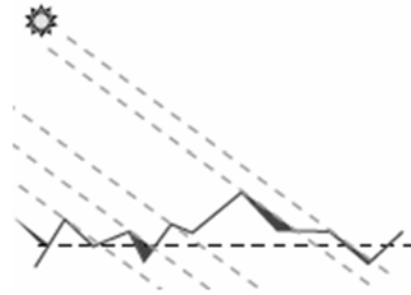


图 3 粗糙材质表面对光线的阴影效果

Fig. 3 Shadowing effects to light on rough surfaces

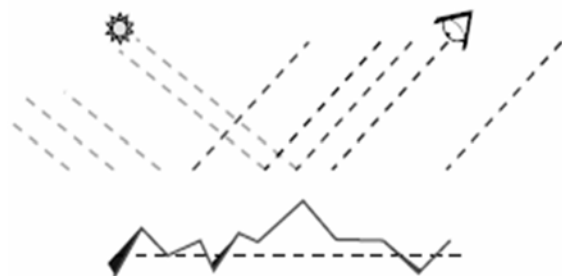


图 4 粗糙材质表面对光线的阴影效果

Fig. 4 Masking effects to light on rough surfaces

当前应用最为广泛、有效的阴影与遮挡函数是基于 Beards-Maxwell BRDF 模型中的思想建立的,并在 NEF 数据库中得以实现和应用,其函数形式如下式:

$$SO(\theta, \beta, \tau, \Omega) = \frac{1 + \frac{\theta}{\Omega} \exp(-2\beta/\tau)}{1 + \frac{\theta}{\Omega}}, \quad (20)$$

式中 β 是光线相对于微面元法线的镜面反射角, τ 和 Ω 是阴影与遮蔽函数参数, τ 和 Ω 值越小表征材质表面粗糙度越大, 遮蔽效应越强, 因此倾斜入射光线和散射光线就有相对更大可能性被其他微面元所遮挡或再次反射到其他方向。

PG 模型除了计算菲涅尔形式的镜面偏振影响外, 还考虑到光的非偏振的散射成分。该非偏振分量包括漫散射和体散射两部分^[8], 计算方法如下式:

$$f_{vol} = \rho_d + \frac{2\rho_v}{\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)}, \quad (21)$$

其中漫散射参数 ρ_d 模拟朗伯体理想散射, 该部分散射是不依赖于散射方向、完全非偏振的。体散射参数 ρ_v 表征入射辐照光被微面元吸收并立即反射出去的作用效果, 体散射也是完全非偏振的。

4 PG 模型分析及数值仿真

PG 模型仿真需要设定模型计算的坐标系, 本文设定面元所在平面为 $x-y$ 平面, y 轴指向方位角 0° 方向, 顺时针为 $[0^\circ, 180^\circ]$, 逆时针为 $[0^\circ, -180^\circ]$, z 轴指向天顶角 0° 方向, 由 z 轴到 $x-y$ 水平面为天顶角 $[0^\circ, +90^\circ]$, 如下图所示:

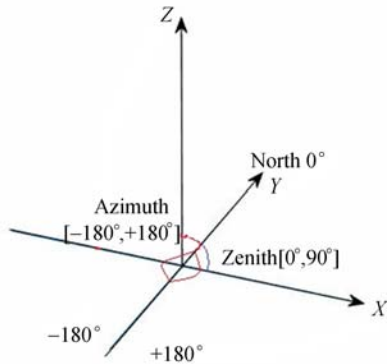


图 5 PG 模型坐标系

Fig. 5 Coordinate system of PG

固定入射光线的入射方位, 选取两组不同的材质参数, 对半球空域的所有探测方位进行了数值仿真分析。设定入射偏振光的方位角 50° , 俯仰角为 0° , 入射偏振光的 Stokes 矢量为 $[I, Q, U, V] = [1, 0, 0, 0]$, 即为非偏振的自然光。空气折

射率 $1 + 0.0003i$, 微面元材质 1 的折射率为 $1.315 + 0.21i$, 模型参数为 $\Omega = 1.459$, $\tau = 0.1354$, $B = 3.65$, $\sigma = 0.046$, $\rho_d = 0.872566$, $\rho_v = 0$, 材质 2 的折射率为 $1.366 + 0.2746i$, 模型参数 $\Omega = 0.1288$, $\tau = 8.789e1$, $\sigma = 1.499e2$, $\rho_d = -9.450e-4$, $\rho_v = -1.285e-3$ 探测方位为水平角 $[-180^\circ, 180^\circ]$, 方位角 $[0^\circ, 90^\circ]$, 分别每间隔 1° 计算数值仿真结果。

材质 1 和材质 2 微面元概率分布函数计算结果如下图:

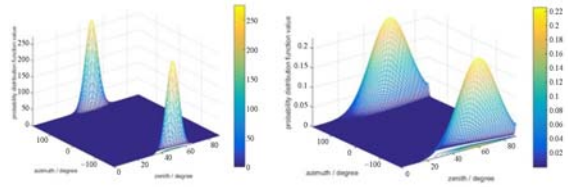


图 6 材质 1 和材质 2 对应不同方位角和俯仰角的概率分布函数

Fig. 6 Probability distribution function value corresponding to azimuth and zenith of material 1 and 2

由上图可以看出, 材质 1 微面元概率分布函数在方位角, 俯仰角情况下达到最大值 270, 而材质 2 微面元概率分布函数在方位角 $\pm 180^\circ$, 俯仰角 60° 附近情况下达到最大值 0.22。

材质 1 和材质 2 的阴影与遮蔽函数计算结果如图 7 所示。

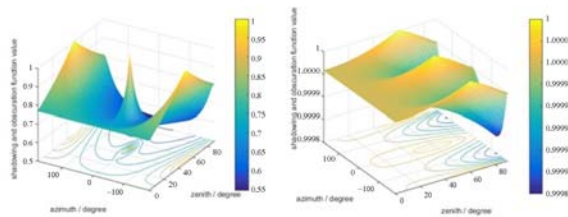


图 7 材质 1 和材质 2 对应不同方位角和俯仰角的阴影与遮蔽函数

Fig. 7 Shadowing and obscuration function value corresponding to azimuth and zenith of material 1 and 2

可以看出, 材质 1 在方位角为 $\pm 180^\circ, 0^\circ$, 俯仰角 45° 时阴影与遮蔽函数取到最大值 1, 且函数关于方位角 0° 以及俯仰角 45° 成对称分布, 而材质 2 在方位角为 $\pm 180^\circ, 0^\circ$, 俯仰角 60° 时阴影与遮蔽函数取到最大值 1, 两种材质的阴影与遮蔽

函数分布差异较大。

材质 1 和材质 2 散射光强度及偏振度随角度变化如下图：

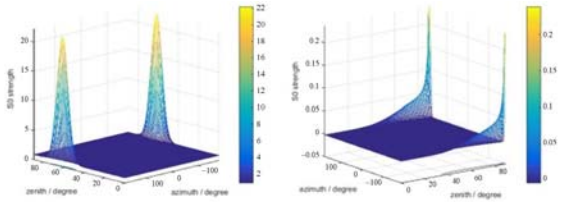


图 8 材质 1 和材质 2 对应不同方位角和俯仰角的 S0 强度

Fig. 8 S0 strength value corresponding to azimuth and zenith of material 1 and 2

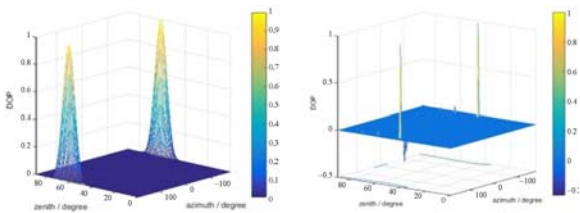


图 9 材质 1 和材质 2 对应不同方位角和俯仰角的 DoP 值

Fig. 9 DoP value corresponding to azimuth and zenith of material 1 and 2

可以看出,材质 1 和材质 2 的散射光强度及偏振度随探测方位总体变化趋势有一定区别,取得极值范围也不同。综上可以得到结论,利用 PG 模型进行探测仿真能够针对不同材质得到不同数值结果,对于不同的观测方位也会得到不同的仿真结果。

5 仿真软件设计及仿真结果

仿真软件开发平台主要基于 VS2013 集成开

发环境,开发语言 C/C++,仿真软件能得到较好的可视化效果。开发前期的 3D 场景模型组合、标定利用 Autodesk 3ds Max 2012 实现。软件读入场景模型、天空半球空域辐照模型文件后,动态地优化半球空域辐照模型,然后对场景模型的每个面元基于 PG 模型进行计算,迭代得到目标模型所有微面元的偏振仿真数据,最后将场景模型的偏振仿真结果利用 OpenGL 交互式地渲染到显示界面。软件处理流程如下图 9 所示。

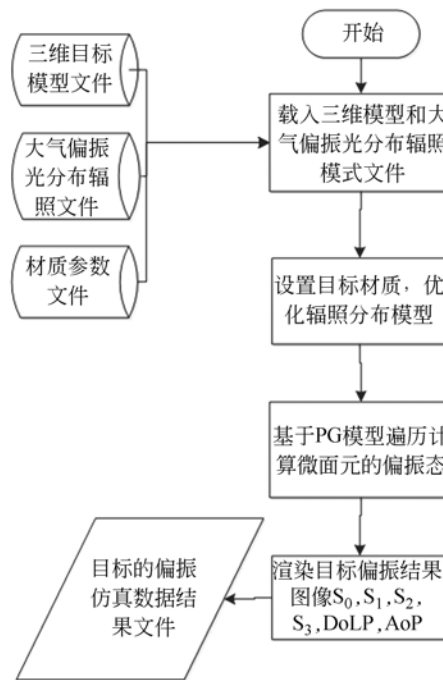


图 10 仿真软件流程图

Fig. 10 Flow diagram of simulation software

偏振场景仿真计算主要依赖于 PG 模型,在进行计算前需要设定材质的模型参数,材质的不同光学特性参数会随不同波长的辐照光而变化,常见的 PG 模型材质(绿漆、黑漆)参数^[1]如表 1。

表 1 常见粗糙表面材质 PG 模型参数^[1]

Tab. 1 PG model parameters for rough material surfaces

材质	λ/nm	n	k	B	σ	τ	Ω	ρ_d	ρ_v
绿漆	440	1.376 6	0.289 59	0.173 996	0.468 383	0.221 21	1.683 83	0.042 161	0.001 769
	550	1.366	0.274 6	0.023 5	0.128 8	8.789 e1	1.499 e2	-9.450 e-4	-1.285 e-3
	600	1.125	1.000	0.006 8	0.074 2	1.471 e2	5.338 e1	4.108 e-3	-1.645 e-3
黑漆	440	1.433	0.010 2	0.574 2	0.852 4	4.756 e1	7.410 e-2	2.290 e-2	3.100 e-2
	550	1.285	0.292 3	0.235 6	0.805 7	7.145 e1	1.960 e-1	1.664 e-3	6.500 e-3
	600	1.773	0.414 6	0.070 6	0.755 6	2.286 e2	2.092 e0	6.629 e-4	2.812 e-4

偏振场景仿真软件的运行需要设置半球空域大气偏振光分布数据,在后面的仿真实验中分别选取晴朗天气条件下的 440 nm 和 600 nm 大气偏振光分布作为仿真实验数据,具体的大气辐照测量环境条件如表 2^[1]所示:

表 2 大气偏振光辐照环境仿真参数

Tab. 2 Environment parameters of atmosphere polarization irradiance

纬度/(°)	经度/(°)	高程/km	时间	气溶胶参数
北纬	东经	35	2016/6/24	光学厚度 0.6
40	116		12:00	城市型

两种波段的大气偏振光分布数据如图 11 所示,其中两种波段下的大气偏振光 S3 分量均可忽略不计,两个波长的大气偏振光分布状态接近,数值强度不同。

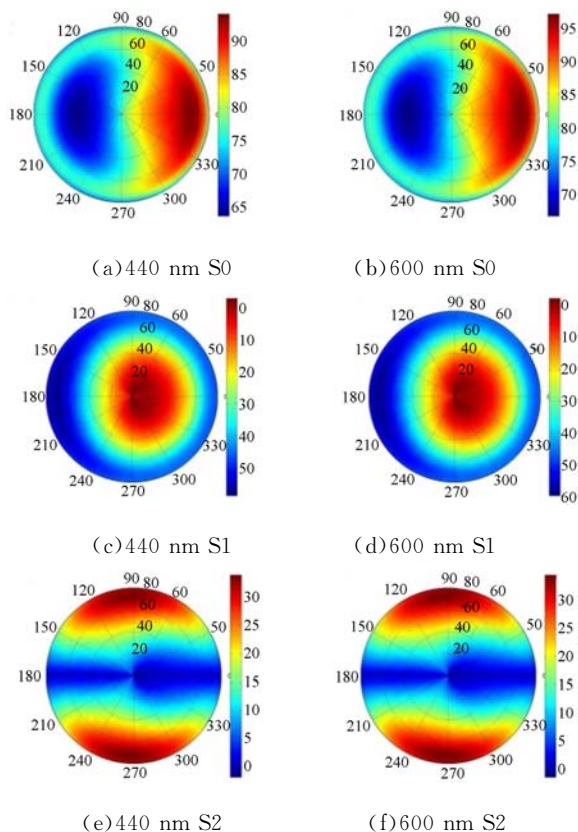


图 11 大气偏振光分布数据

Fig. 11 Polarization light distribution of atmosphere

下面给出两类目标(分别称为目标 A 和目标 B)分别在 440 nm 和 600 nm 波段的偏振场景仿真图像(其中 DoP 图像对目标典型区域偏振度进

行标明),并给出相应的灰度直方图分布曲线。

第一组仿真实验:目标 A 表面材质设置绿漆材质,微面元表面概率分布模型设定为高斯分布,探测器在方位角 0°,天顶角 30°条件下,两组辐照波长的相应仿真结果如图 12 所示。

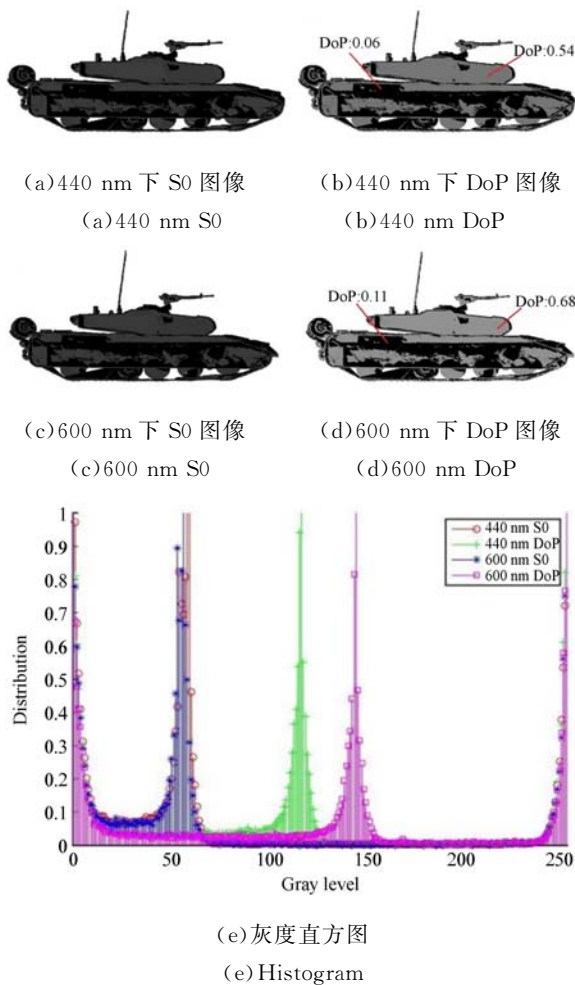
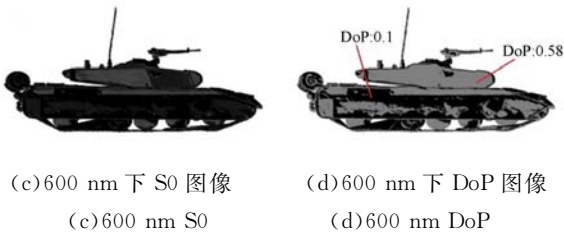


图 12 实验一仿真结果

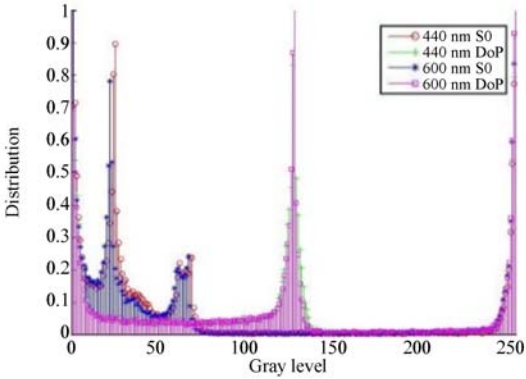
Fig. 12 Simulation result of test 1

第二组仿真实验:目标 A 表面材质设置黑漆材质,微面元表面概率分布模型设定为高斯分布,探测器在方位角 0°,天顶角 30°条件下,两组辐照波长的相应仿真结果如图 13 所示。





(c) 600 nm 下 S0 图像
(d) 600 nm 下 DoP 图像



(e) 灰度直方图
(e) Histogram

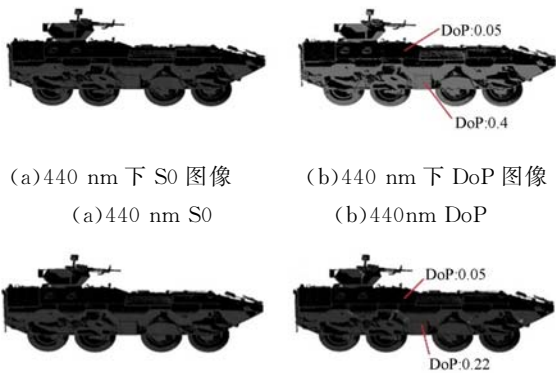
图 13 实验二仿真结果

Fig. 13 Simulation result of test 2

第三组仿真实验:目标 B 表面材质设置绿漆材质,微面元表面概率分布模型设定为高斯分布,探测器在方位角 0° ,天顶角 30° 的条件下,两组辐照波长的相应仿真结果如图 14 所示。

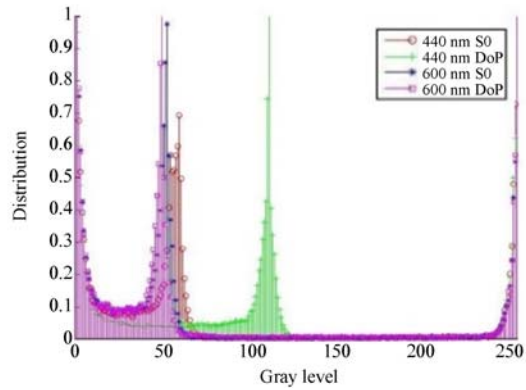
第四组仿真实验:目标 B 表面材质设置黑漆材质,微面元表面概率分布模型设定为高斯分布,探测器在方位角 0° ,天顶角 30° 条件下,两组辐照波长的相应仿真结果如下。

由上述每组实验结果可以看到,相同目标在相同材质情况下,不同波长的辐照会产生不同的偏振图像。这是因为在不同波长情况下,相同材



(a) 440 nm 下 S0 图像
(b) 440 nm 下 DoP 图像

(c) 600 nm 下 S0 图像
(d) 600 nm 下 DoP 图像



(e) 灰度直方图
(e) Histogram

图 14 实验三仿真结果

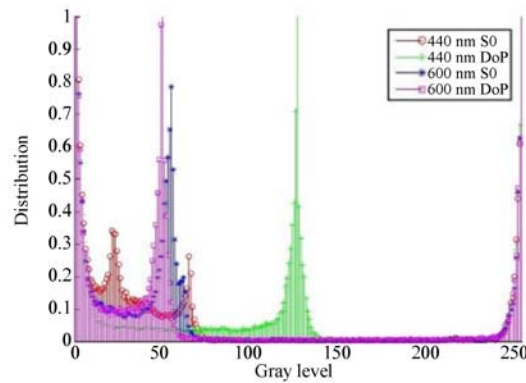
Fig. 14 Simulation result of test 3



(a) 440 nm 下 S0 图像
(b) 440 nm 下 DoP 图像



(c) 600 nm 下 S0 图像
(d) 600 nm 下 DoP 图像



(e) 灰度直方图
(e) Histogram

图 15 实验二仿真结果

Fig. 15 Simulation result of test 4

质会表示出不同的物理特性,且强度 S0 图像与

DoP 图像不同。

分别比较实验一与实验二中在 440 nm 辐照下的 S0、DoP 图像的直方图,如图 16 和图 17 所示。

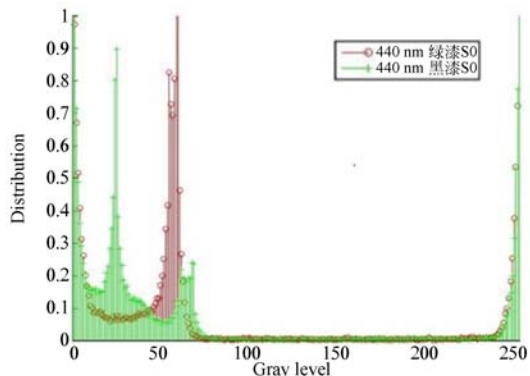


图 16 440 nm 辐照下目标 1 不同材质 S0 偏振图像对比
 Fig. 16 Contrast of S0 polarization image for target 1 with different materials in 440 nm irradiation

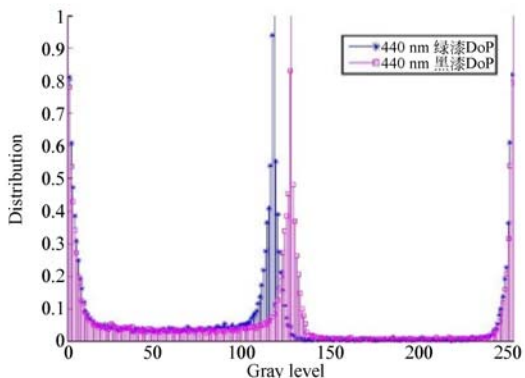


图 17 440 nm 辐照下目标 1 不同材质 DoP 偏振图像对比
 Fig. 17 Contrast of DoP polarization image for target 1 with different materials in 440 nm irradiation

上述两组比较结果显示,同一目标在相同波长辐照条件下产生的偏振结果图像会根据不同材质变化,图像的灰度分布集中区域不同,根据灰度分布图模型能够分辨材质。

分别比较实验一和实验三在 400 nm 和 600 nm 辐照条件下的 S0 偏振结果图像,如图 18 和图 19 所示。

上述两组比较显示,不同目标在相同材质相同波长辐照条件下的 S0 偏振图像灰度分布相近,但不完全相同。主要原因是不同目标的表面微元分布不同,PG 模型中的概率分布函数对不同目

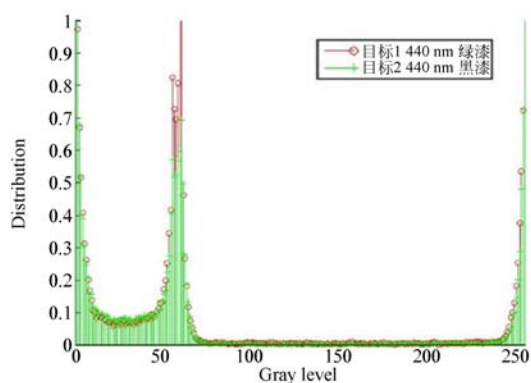


图 18 440 nm 辐照下相同材质的目标 1 和目标 2 的 S0 偏振图像对比
 Fig. 18 Contrast of S0 polarization image for target 1 and target 2 with same materials in 440 nm irradiation

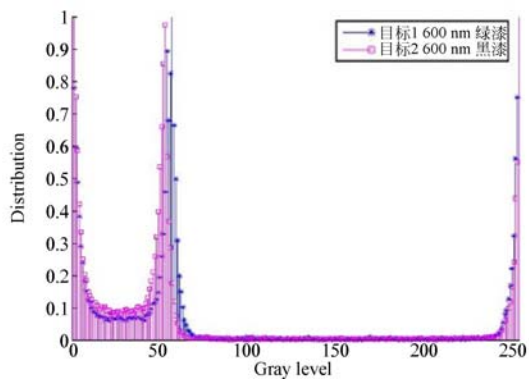


图 19 600 nm 辐照下相同材质的目标 1 和目标 2 的 S0 偏振图像对比
 Fig. 19 Contrast of S0 polarization image for target 1 and target 2 with same materials in 600 nm irradiation

标产生不同影响,由此可知偏振仿真算法能区分不同目标。

综合四组实验以及上述比较结果可以看到,基于 PG 模型得到的仿真结果依赖于不同的大气辐照条件(辐照波长)、不同材质物理特性以及目标表面的面元分布特性。即:不同的目标在同一辐照环境、相同材质条件下,仿真结果的灰度分布直方图不同;同一目标在相同材质、不同的辐照环境条件下,仿真结果不同;同一目标在相同辐照环境、不同材质条件下,仿真结果不同。

由此得出结论:基于 PG 模型的偏振仿真软件对目标、辐照、材质具有较高的敏感性,能够提供较好的分辨、识别能力,具体分析如下:

(1)不同的目标表面微元分布不同,在 PG 模型中表现为微元概率分布函数取值不同,并且不同目标表面粗糙程度不同,会影响阴影与遮挡函数取值不同;

(2)不同波长的辐照光,会影响同一材质的物理参数和 PG 模型参数,尤其是复折射率会随波长变化,进而不同材质、辐照环境下,目标仿真生成不同偏振图像;

(3)不同大气偏振光分布模式,会产生不同强度的入射偏振光矢量,与矩阵矢量运算后得到不同强度散射偏振光矢量,最终得到不同偏振图像;

(4)不同材质本身具有不同物理特性,相对应的 PG 模型参数不同。

与偏振态图像对比,利用灰度直方图更方便突出偏振态图像之间的分布差别,便于根据灰度分布直方图推测目标。基于 VS2013(C++)平台实现的仿真软件能够得到更直观的可视化

效果。

6 结 论

本文主要研究了在不同目标、不同材质、不同辐照背景下 PG 模型的仿真效果,提出并实现了一种可视化、可交互的偏振视景仿真方法,并提供了生成偏振图像灰度分布图功能,以便于分辨目标。

本文提出的偏振视景目标探测仿真软件整体仿真效果较好且可应用性强,可为将来的农业遥感、地理信息和战争模拟提供了客观的借鉴或解决方案^[9-11]。

本课题的下一步工作是对基于基础材质粗糙面板的实物偏振图像与偏振仿真软件生成的目标偏振图像进行比对,以达到模型验证目的。

参考文献:

- [1] 刘卿,战永红,杨迪,等.粗糙表面偏振二向反射分布函数的影响参数及其反演[J].飞行器测控学报,2015,34(5):481-488.
LIU Q, ZHAN Y H, YANG D, *et al.*. Parameters of the polarimetric bidirectional reflectance distribution function of rough surfaces and parameter inversion[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2015, 34(5): 481-488. (in Chinese)
- [2] 高明,宋冲,巩蕾.基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究[J].中国激光,2013,40(12):1213002.
GAO M, SONG CH, GONG L. Analysis of polarization characteristics about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 1213002. (in Chinese)
- [3] 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.
CHEN W L, WANG SH H, JIN W Q, *et al.*. Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(5): 507-514. (in Chinese)
- [4] 孙辰.天空偏振光分布局部模式的获取与分析[D].合肥:中国科学技术大学,2014.
SUN CH. *Acquisition and analysis of partial sky-light polarization distribution pattern*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [5] RENHORN I G E, HALLBERG T, BOREMAN G D. Efficient polarimetric BRDF model[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24):31253.
- [6] PRIEST R G, GERMER 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.
- [7] PRIEST R G, MEIER S R. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surface[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(5): 988-993.
- [8] SCHOTT J R. *Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing*[M]. Bellingham, Wash, USA: SPIE Press, 2009: 190-210.

- [9] 王霞, 梁建安, 龙华宝, 等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0704002.
WANG X, LIANG J A, LONG H B, *et al.*. Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0704002. (in Chinese)
- [10] 张焱, 李吉成, 王沙飞, 等. 红外偏振特性建模与实验验证[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0604001.
ZHANG Y, LI J C, WANG SH F, *et al.*. Modeling and quantitative analysis of infrared polarization characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0604001. (in Chinese)
- [11] GERMER T A, FOLDYNA M, MRAZKOVA Z, *et al.*. Mueller matrix bidirectional reflectance distribution function measurements and modeling of textured silicon surfaces [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9961: 996107.

导师简介:



李岩(1970—),男,吉林舒兰人,研究员,硕士生导师,主要研究方向为光电对抗C3I系统建模、仿真与算法。E-mail:ly2455@sina.com

通讯作者:



张伟杰(1990—),男,吉林长春人,2013年于大连理工大学获得学士学位,主要研究方向为计算机仿真。E-mail:zhangweijie15@mails.ucas.ac.cn