折反式望远系统全视场全口径偏振特性研究

王稼禹[1,2],李英超[2],史浩东[2],江 伦[2],王 超[2],刘 壮[2],李冠霖[2]

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 空间光电技术研究所,吉林 长春 130022)

摘 要: 针对单根光线追迹方法在部分偏振光条件下无法对系统进行全面评价的问题, 基于斯托克斯表示法提出了全视场、全口径光线追迹方法,通过对原有折射与反射穆勒矩阵表达式的优化,建立入射光偏振度、光线角度等参量与出射光偏振度的解析关系;理论分析结果表明,入射角与折射角的差值控制在 5.7°以内,可以有效减少系统对光线偏振度的影响;依据空间目标成像需求设计了集成微偏振片阵列的偏振成像系统,成像分辨率 500 km 处为 0.5 m;采用动态数据交换机制对光学系统进行全视场、全口径光线追迹,得到系统斯托克斯矢量及偏振度的全视场分布,实现对系统任意视场偏振度的标定,提升偏振探测精度。亦可通过任意视场与中心视场偏振度匹配入射光偏振度,反演目标。

关键词: 偏振成像; 偏振度; 全口径; 穆勒矩阵; 光线追迹

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0318004

Study on polarization characteristics of full-field and full-pupil in refractive and reflection telephoto system

Wang Jiayu[1,2], Li Yingchao[2], Shi Haodong[2], Jiang Lun[2], Wang Chao[2], Liu Zhuang[2], Li Guanlin[2]

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the evaluation problem of optical system under partially polarized light conditions caused by single ray tracing method, a full-field, full-pupil ray tracing method based on Stokes notation was proposed. The refractive and reflection Mueller matrix expressions were improved. The analytical relationship among the degrees of polarization(DOP) of the incident light, the ray angle and the DOP of the emitting light was analyzed. The analysis results show that when the difference value between the incident angle and the emergence angle was less than 5.7°, the influence of the system on the DOP of the light can be reduced effectively. According to the space target polarization imaging requirements, a polarization imaging optical system with micro-polarizer array (MPA) was designed. The resolution was 0.5 m at the distance of 500 km. Dynamic data exchange(DDE) was used to trace the full-field and full-pupil rays for the optimized optical system. Four Stokes vectors and full-field polarization distributions were both calculated and displayed. Due to the DOP of any field of view can be calibrated, the polarization detecting accuracy of the optical system was improved. Therefore, the target can be recognized by matching the DOP of the incident light and the DOP of any field of view.

Key words: polarization imaging; polarization degree; full-pupil; Mueller matrix; ray tracing

收稿日期: 2018-10-05; **修订日期:** 2018-11-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0803806);国家自然科学基金联合基金(U1731240);吉林省科技发展计划(20160204066GX)

作者简介: 王稼禹(1993-),男,硕士生,主要从事光学设计、偏振探测方面的研究。Email:515610926@qq.com

导师简介: 李英超(1966-),男,研究员,博士生导师,主要从事光电仪器应用方面的研究。Email:hsjlyc@126.com

0 引 言

随着空间技术的不断发展，为保障我国太空资产安全，亟需对卫星进行在轨探测与识别，进而判断其战略意图。传统强度或光谱探测手段易受宇宙辐射干扰，探测识别效果不佳[1-2]。研究表明：太阳发出的自然光经卫星表面反射后会变为部分线偏振光[3]，可利用偏振探测滤除背景杂光，提高成像对比度。偏振光强占总光强的比例即偏振度，偏振度与目标材质和观测角度等条件息息相关。可通过获取卫星偏振度信息反演目标材质，再结合目标形貌和姿态，进而实现对卫星的辨识[4]。

然而，由于入射光偏振度经光学系统折射或反射后会发生改变，此类仪器效应严重影响偏振探测精度，对目标的反演识别造成偏差[5]。因此，光学系统偏振度特性的分析与标定对提高偏振探测性能具有重要意义。美国亚利桑那大学开发的光学设计程序 Polaris-M 通过对多个偏振波前分量进行单独分析，可研究多个各向异性光学元件在图像上的偏振特性 [6]。法国空研中心建立了大视场偏振成像仪的斯托克斯矢量数理模型，实现了对系统偏振特性的定量描述 [7]。国内对光学系统偏振特性的研究起步较晚，王国聪等人基于琼斯矢量对自适应望远系统进行了建模分析与保偏改进 [8]；张颖等人基于琼斯矢量对透射和反射旋转对称光学系统进行了建模偏振分析[9-10]；李春艳等人对光束通过偏振棱镜后出射光束的偏振态变化与分布进行了理论研究及仿真分析[11]。现有偏振分析普遍对系统单根光线进行追迹，然而当入射光为非完全偏振光时，难以寻找到代表整个系统对偏振光影响的追迹结果。设计者难以根据单根光线追迹结果对光学系统进行有效的偏振分析，更难以对探测精度进行有效准确的标定[5-11]。

文中基于斯托克斯矢量与穆勒矩阵，根据分界面反射与折射时的光传输理论，对基础穆勒矩阵根据需要进行化简，推导同轴折反射式光学系统偏振度的解析表达式，分析光学系统对非完全线偏振光偏振度特性的影响；通过对传统单根光线偏振追迹方法进行改进，结合动态数据交换机制，利用光学设计软件的光线追迹功能，编程对设计的集成微偏振片阵列的偏振成像系统[12]的穆勒矩阵进行模拟，得到全口径下全视场的斯托克斯矢量与偏振度，分析系统对偏振度的影响，从而验证理论分析的正确性。也为准确标定光学系统全视场偏振度特性提供新的解决途径。

1 偏振光描述及分析

对偏振光的描述一般采用琼斯矢量法或斯托克斯矢量法。琼斯矢量法基于琼斯矢量运算，穆勒矩阵基于斯托克斯矢量运算。因卫星反射的光为部分偏振光，而琼斯矩阵无法表达部分偏振光，因此文中采用斯托克斯矢量 $\text{Stokes}=\begin{bmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{bmatrix}$ 来表示光的偏振信息。其中 I 表示总光强；M 表示 0°和 90°两个偏振方向上光强的差异；C 表示 45°和 135°两个偏方向上光强的差异；S 表示左旋和右旋圆偏振光强的差异[13]。当入射光经光学元件后，入射光和出射光斯托克斯矢量之间的关系可用一个 4×4 的穆勒矩阵来表征，即

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ M_2 \\ C_2 \\ S_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_1 \\ M_1 \\ C_1 \\ S_1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

光每次入射光学元件都可以穆勒矩阵表示为 M_i $(i=1,2,\cdots,n)$，从光线通过偏振元件 n 次出射的斯托克斯矢量为[13]：

$$\begin{bmatrix} I' \\ M' \\ C' \\ S' \end{bmatrix}=M_nM_{n-1}\cdots M_2M_1\begin{bmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{bmatrix} \tag{2}$$

光束中偏振部分光强和总光强的比值用偏振度来定义：$P=\dfrac{\sqrt{M^2+C^2+S^2}}{I}$ $(0\leqslant P\leqslant 1)$。

由矩阵关系可得折射光的穆勒矩阵为[13]：

$$M_t=\frac{1}{2}\frac{\sin 2\theta_1\sin 2\theta_2}{(\sin b\cos a)^2}\times\begin{bmatrix} \cos^2 a+1 & \cos^2 a-1 & 0 & 0 \\ \cos^2 a-1 & \cos^2 a+1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\cos a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\cos a \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：θ_1 为入射角；θ_2 为折射角；$a=\theta_1-\theta_2$，$b=\theta_1+\theta_2$。

根据光波在金属表面反射理论，镜面反射的穆勒矩阵为[14]：

$$M_m=\begin{bmatrix} r_pr_p^*+r_sr_s^* & r_pr_p^*-r_sr_s^* & 0 & 0 \\ r_pr_p^*-r_sr_s^* & r_pr_p^*+r_sr_s^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_pr_s^*+r_sr_p^* & i(r_pr_s^*-r_sr_p^*) \\ 0 & 0 & i(r_sr_p^*-r_pr_s^*) & r_sr_p^*+r_pr_s^* \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：r_p 和 r_s 分别为金属表面对入射光的 p 和 s 分量的反射系数，分别定义为：

$$\begin{cases} r_p=\dfrac{(n^2+\chi^2)^2\cos^2\theta_i-n_i^2(N^2+\chi'^2)+2in_i\cos\theta_i[(n^2-\chi^2)\chi'-2Nn\chi]}{[(n^2-\chi^2)\cos\theta_i+n_iN]^2+(2n\chi\cos\theta_i+n_iN)^2} \\ r_s=\dfrac{(n_i^2\cos^2\theta_i-N^2)-\chi'^2+2i\chi' n_i\cos\theta_i}{(n_i\cos\theta_i+N)^2+\chi'^2} \end{cases} \tag{5}$$

式中：N、χ' 的表达式分别为：

$$\begin{cases} N=\sqrt{\dfrac{1}{2}\{(n-i\chi)^2-n_i^2\sin^2\theta_i+\sqrt{[(n-i\chi)^2-n_i^2\sin^2\theta_i]^2+4n^2\chi^2}\}} \\ \chi'=\sqrt{-\dfrac{1}{2}(n-i\chi)^2-n_i^2\sin^2\theta_i+\sqrt{[(n-i\chi)^2-n_i^2\sin^2\theta_i]^2+4n^2\chi^2}\}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$n-i\chi$ 为金属的复折射率；i 为虚数单位；χ 决定于光波在吸收性介质中传播时的衰减；n、n_i 为吸收介质、入射介质的折射率；θ_i 为入射角。公式(1)中的穆勒矩阵在对 0°或 90°线偏振光 $\begin{bmatrix}1\\p_{in}\\0\\0\end{bmatrix}$ 计算中只有 M_{11}、M_{12}、M_{21}、M_{22} 参与计算，且由公式(3)和(4)可知，$M_{12}=M_{21}$，$M_{11}=M_{22}$。所以在计算中可将透镜的穆勒矩阵化简为：

$$M_t'=\begin{bmatrix}M_{11}&M_{12}\\M_{12}&M_{11}\end{bmatrix}=\frac{\sin2\theta_1\sin2\theta_2}{2(\sin b\cos a)^2}\begin{bmatrix}\cos^2a+1&\cos^2a-1\\\cos^2a-1&\cos^2a+1\end{bmatrix} \tag{7}$$

经一次折射的线偏振光偏振度为：

$$P_{t1}=\frac{|\cos^2a_1-1+(\cos^2a_1+1)\times P_{in}|}{\cos^2a_1+1+(\cos^2a_1-1)\times P_{in}} \tag{8}$$

式中：a_n 代表第 n 次折射时的入射角与折射角之差 $a_n=\theta_{n1}-\theta_{n2}$。

同理，线偏振光经过 n 次折射的穆勒矩阵为：

$$M_m'=\left(\frac{\sin2\theta_{11}\sin2\theta_{12}}{2(\sin b_1\cos a_1)^2}\right)\cdots\left(\frac{\sin2\theta_{n1}\sin2\theta_{n2}}{2(\sin b_n\cos a_n)^2}\right)\begin{bmatrix}\cos^2a_n+1&\cos^2a_n-1\\\cos^2a_n-1&\cos^2a_n+1\end{bmatrix}\cdots\begin{bmatrix}\cos^2a_1+1&\cos^2a_1-1\\\cos^2a_1-1&\cos^2a_1+1\end{bmatrix}=$$
$$\left(\frac{\sin2\theta_{11}\sin2\theta_{12}\cdots\sin2\theta_{n1}\sin2\theta_{n2}}{2(\cos a_1\cdots\cos a_n\times\sin a_1\cdots\sin a_n)^2}\right)\begin{bmatrix}\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n+1&\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n-1\\\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n-1&\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n+1\end{bmatrix} \tag{9}$$

n 次折射的出射线偏振光偏振度为：

$$P_m=\frac{|(\cos^2a_1\cos^2a_2\cdots\cos^2a_n-1)+(\cos^2a_1\cos^2a_2\cdots\cos^2a_n+1)\times P_{in}|}{(\cos^2a_1\cos^2a_2\cdots\cos^2a_n+1)+(\cos^2a_1\cos^2a_2\cdots\cos^2a_n-1)\times P_{in}} \tag{10}$$

卫星表面偏振度主要由太阳能电池板决定，约在 5%左右[15]，设 $P_{in}\approx5\%$，根据公式(8)可推出在设计光学系统时，如控制入射光与出射光的角度差在 5.7°以内，$P_{in}-P_{out}=P_{in}-\dfrac{|M_{12}+M_{11}\times P_{in}|}{M_{11}+M_{12}\times P_{in}}<10\%P_{in}$，光学系统对偏振度的影响可减小到入射光偏振度的 10%以内。

线偏振光经 n 次折射的得到的穆勒矩阵 $M_m'=\begin{bmatrix}M_{11}&M_{12}\\M_{12}&M_{11}\end{bmatrix}$ 在公式(9)中表达为：

$M_{11}=\left(\dfrac{\sin2\theta_{11}\sin2\theta_{12}\cdots\sin2\theta_{n2}}{2(\cos a_1\cdots\cos a_n\times\sin a_1\cdots\sin a_n)^2}\right)(\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n+1)$，因为入射角不会超过 90°，所以 $M_{11}>0$ 且随着折射次数 n 的增加而减小；同理 $(\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n-1)<0$，所以

$M_{12}=\left(\dfrac{\sin2\theta_{11}\sin2\theta_{12}\cdots\sin2\theta_{n2}}{2(\cos a_1\cdots\cos a_n\times\sin a_1\cdots\sin a_n)^2}\right)(\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n-1)<0$

且随着折射次数 n 的增加而增大。M_{11} 为经过光学元件后的光强系数，M_{12} 为光学元件对偏振度影响系数。

同理可得线偏振光经一次镜面反射的穆勒矩阵化简为：

$$M_m'=\begin{bmatrix}M_{11}'&M_{12}'\\M_{12}'&M_{11}'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_pr_p^*+r_sr_s^*&r_pr_p^*-r_sr_s^*\\r_pr_p^*-r_sr_s^*&r_pr_p^*+r_sr_s^*\end{bmatrix} \tag{11}$$

一次镜面反射的线偏振光偏振度为：

$$P_{m1}=\frac{|r_pr_p^*-r_sr_s^*+(r_pr_p^*+r_sr_s^*)\times P_{in}|}{r_pr_p^*+r_sr_s^*+(r_pr_p^*-r_sr_s^*)\times P_{in}} \tag{12}$$

可推导出线偏振光 m 次反射的穆勒矩阵为：

$$M_{mm}'=\begin{bmatrix}r_{pm}r_{pm}^*+r_{sm}r_{sm}^*&r_{pm}r_{pm}^*-r_{sm}r_{sm}^*\\r_{pm}r_{pm}^*-r_{sm}r_{sm}^*&r_{pm}r_{pm}^*+r_{sm}r_{sm}^*\end{bmatrix}\cdots\begin{bmatrix}r_{p1}r_{p1}^*+r_{s1}r_{s1}^*&r_{p1}r_{p1}^*-r_{s1}r_{s1}^*\\r_{p1}r_{p1}^*-r_{s1}r_{s1}^*&r_{p1}r_{p1}^*+r_{s1}r_{s1}^*\end{bmatrix}=$$
$$\begin{bmatrix}2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^*\cdots r_{pm}r_{pm}^*+r_{s1}r_{s1}^*\cdots r_{sm}r_{sm}^*)&2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^*\cdots r_{pm}r_{pm}^*-r_{s1}r_{s1}^*\cdots r_{sm}r_{sm}^*)\\2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^*\cdots r_{pm}r_{pm}^*-r_{s1}r_{s1}^*\cdots r_{sm}r_{sm}^*)&2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^*\cdots r_{pm}r_{pm}^*+r_{s1}r_{s1}^*\cdots r_{sm}r_{sm}^*)\end{bmatrix} \tag{13}$$

m 次反射的线偏振光偏振度为：

$$P_{mm}=\frac{|(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}-r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})+(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}+r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})\times P_{\text{in}}|}{(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}+r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})+(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}-r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})\times P_{\text{in}}} \tag{14}$$

由公式(13)可知，反射时的 M_{11}'，M_{12}' 和折射时的 M_{11}，M_{12} 矩阵特性相似，可得 $M_{11}'=2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}+r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})>0$，且随着反射次数的增加单调减小。$M_{12}'=2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}-r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})<0$，且随着反射次数的增加单调增加。

由公式(10)和(14)可知，不论在折射还是反射中，出射光偏振度在入射光偏振度 $P_{\text{in}}=\left|\frac{M_{12}}{M_{11}}\right|$ 或 $P_{\text{in}}=\left|\frac{M_{12}'}{M_{11}'}\right|$ 达到极小值。

同理对于 45°或 135°线偏振光 $\begin{bmatrix}1\\0\\p_{\text{in}}\\0\end{bmatrix}$，计算中可将透镜的穆勒矩阵化简为：

$$M_t'=\begin{bmatrix}M_{11}&M_{12}&0\\M_{12}&M_{11}&0\\0&0&M_{33}\end{bmatrix}=\frac{\sin2\theta_1\sin2\theta_2}{2(\sin b\cos a)^2}\times\begin{bmatrix}\cos^2a+1&\cos^2a-1&0\\\cos^2a-1&\cos^2a+1&0\\0&0&-2\cos a\end{bmatrix} \tag{15}$$

偏振光经过 n 次折射的穆勒矩阵与偏振度为：

$$\begin{cases}M_{tn}'=\left(\frac{\sin2\theta_{11}\sin2\theta_{12}}{2(\sin b_1\cos a_1)^2}\right)\cdots\left(\frac{\sin2\theta_{n1}\sin2\theta_{n2}}{2(\sin b_n\cos a_n)^2}\right)\begin{bmatrix}\cos^2a_n+1&\cos^2a_n-1&0\\\cos^2a_n-1&\cos^2a_n+1&0\\0&0&-2\cos a\end{bmatrix}\cdots\begin{bmatrix}\cos^2a_1+1&\cos^2a_1-1&0\\\cos^2a_1-1&\cos^2a_1+1&0\\0&0&-2\cos a_1\end{bmatrix}=\\ \left(\frac{\sin2\theta_{11}\sin2\theta_{12}\cdots\sin2\theta_{n1}\sin2\theta_{n2}}{2(\cos a_1\cdots\cos a_n\times\sin a_1\cdots\sin a_n)^2}\right)\begin{bmatrix}\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n+1&\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n-1&0\\\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n-1&\cos^2a_1\cdots\cos^2a_n+1&0\\0&0&\cos a_1\cdots\cos a_n\end{bmatrix}\\ P_{tn}=\frac{\sqrt{(\cos^2a_1\cos^2a_2\cdots\cos^2a_n-1)^2+\cos^2a_1\cos^2a_2\cdots\cos^2a_n\times P_{\text{in}}^2}}{\cos^2a_1\cos^2a_2\cdots\cos^2a_n+1}\end{cases} \tag{16}$$

对于 45°或 135°线偏振光，可得经一次镜面反射的穆勒矩阵为：

$$M_m'=\begin{bmatrix}r_pr_p^{*}+r_sr_s^{*}&r_pr_p^{*}-r_sr_s^{*}&0\\r_pr_p^{*}-r_sr_s^{*}&r_pr_p^{*}+r_sr_s^{*}&0\\0&0&r_pr_s^{*}+r_sr_p^{*}\end{bmatrix} \tag{17}$$

推导出线偏振光 m 次反射的穆勒矩阵与出射光偏振度为：

$$\begin{cases}M_{mm}'=\begin{bmatrix}r_{pm}r_{pm}^{*}+r_{sm}r_{sm}^{*}&r_{pm}r_{pm}^{*}-r_{sm}r_{sm}^{*}&0\\r_{pm}r_{pm}^{*}-r_{sm}r_{sm}^{*}&r_{pm}r_{pm}^{*}+r_{sm}r_{sm}^{*}&0\\0&0&r_{pm}r_{sm}^{*}+r_{sm}r_{pm}^{*}\end{bmatrix}\cdots\begin{bmatrix}r_{p1}r_{p1}^{*}+r_{s1}r_{s1}^{*}&r_{p1}r_{p1}^{*}-r_{s1}r_{s1}^{*}&0\\r_{p1}r_{p1}^{*}-r_{s1}r_{s1}^{*}&r_{p1}r_{p1}^{*}+r_{s1}r_{s1}^{*}&0\\0&0&r_{p1}r_{s1}^{*}+r_{s1}r_{p1}^{*}\end{bmatrix}=\\ \begin{bmatrix}2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}+r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})&2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}-r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})&0\\2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}-r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})&2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}+r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})&0\\0&0&(r_{p1}r_{s1}^{*}+r_{s1}r_{p1}^{*})\cdots(r_{pm}r_{sm}^{*}+r_{sm}r_{pm}^{*})\end{bmatrix}\\ P_{mm}=\frac{\sqrt{[(r_{p1}r_{s1}^{*}+r_{s1}r_{p1}^{*})\cdots(r_{pm}r_{sm}^{*}+r_{sm}r_{pm}^{*})P_{\text{in}}]^2+2^m(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}-r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})}}{2^{m-1}(r_{p1}r_{p1}^{*}\cdots r_{pm}r_{pm}^{*}+r_{s1}r_{s1}^{*}\cdots r_{sm}r_{sm}^{*})}\end{cases} \tag{18}$$

由上文得出的折射与反射的出射光偏振度 $P_{\text{out}}=\frac{|M_{12}+M_{11}\times P_{\text{in}}|}{M_{11}+M_{12}\times P_{\text{in}}}$ 可知，不论是在折射还是反射中，为减小整个光学系统对偏振度的影响，需使 $|M_{12}|$ 接近于0。综上所述，在光学设计中减小 $|M_{12}|$ 即可降低光学元件对偏振度的改变，从而提升系统的偏振探测精度。

2 设计实例

针对 2 m×2 m×2 m 的卫星进行成像，文中选用德国 Mikrotron 的 Eosens4CXP 探测器，像元尺寸 7 μm，

像元数 1 728×2 334。根据几何分辨率和衍射分辨率计算公式,求得光学系统口径 $D \geqslant \frac{1.22\lambda l}{h}$=707.6 mm,其中 h 代表物高,λ 代表平均波长,l 代表探测距离,因此设计光学系统口径为 710 mm。光学系统指标如表 1 所示。

表 1 光学系统指标

Tab.1 Parameters of optical system

Working band/nm	Aperture /mm	Effective focus/m	Field angle	Resolving power
480-650	710	7	5′×5′	0.5 m @500 km

成像系统是一个同轴两反卡塞格林结构系统,如图 1 所示,它由反射球面主镜、双曲面次镜、一片双胶合与五片透镜组成的中继镜构成。系统共有两个焦点,即卡塞格林系统焦点与中继镜焦点,最终光线通过微偏振片后达到探测器。系统总长为1 165.54 mm。

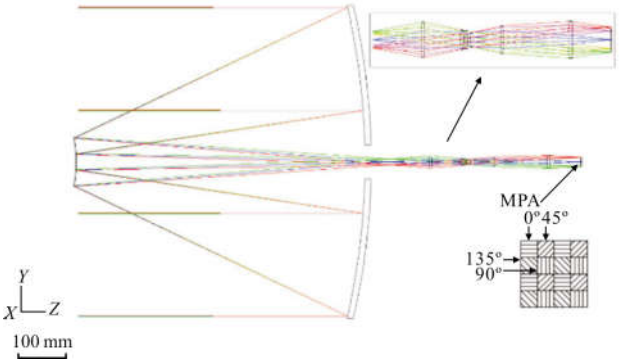


图 1 光学系统光路图

Fig.1 Optical path of optical system

根据前文穆勒矩阵分析结果,为抑制光学系统对偏振度的影响,在保证像质的前提下减小光路偏折角度,入射角折射角差值控制在 11.968 8°以内,最小入射角折射角差值达到 15.234′。

为获取实时偏振态,将微偏振片阵列(MPA)集成在探测器像元上,来获取一个视场的四个的斯托克斯矢量[16]。微偏振片以阵列形式逆时针集成在像元上且和像元一一对应,每 2×2 个单元的接收光强分别为入射光经偏振方向为 0°,45°,90°和 135°偏振片后的光强。因四个像元对应的是不同视场点,为避免瞬时视场误差,取出单元偏振方向相同的像素灰度值,分别复制到四幅同等分辨率的空值图像的相应位置,从而获得四幅图像,每幅图中有 1/4 数据,其他为空值,采用线性插值方法将空值区域数据补齐,即可得到单位像元对应的四个斯托克斯矢量[17]。

光学系统调制传递函数(MTF)曲线如图 2 所示。由图可知,光学系统调制传递函数在奈奎斯特频率 71 lp/mm 处优于 0.4,成像质量满足设计要求。

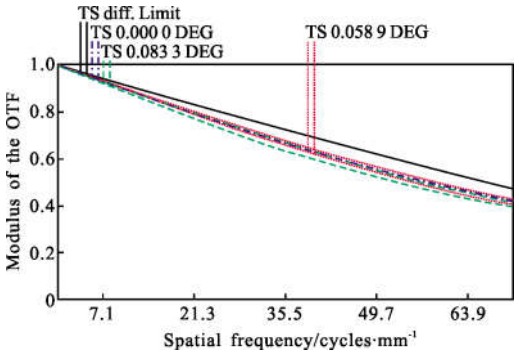


图 2 系统 MTF 曲线

Fig.2 MTF curves of system

3 基于穆勒矩阵的光线追迹

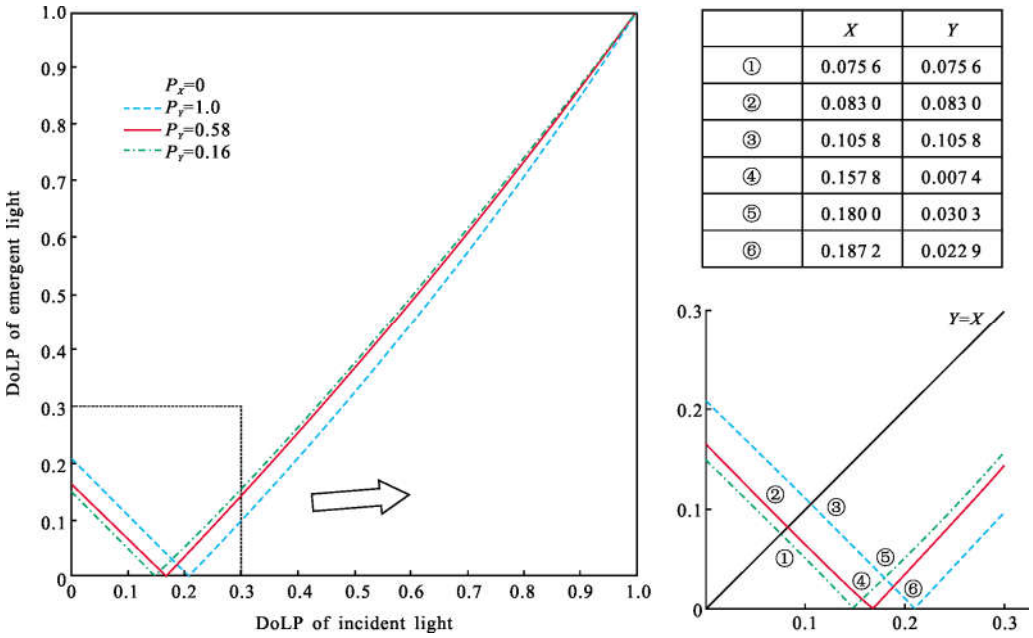
通过对上述光学系统的穆勒矩阵进行计算,在归一化视场 H_X=0、H_Y=1 下选取光瞳坐标(P_X=0,P_Y=1)光线,可得对应的穆勒矩阵为:

$$M_{P_Y=1}=\begin{bmatrix} 0.366\,2 & -0.076\,6 & 0 & 0 \\ -0.076\,6 & 0.366\,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.357\,3 & -0.024\,7 \\ 0 & 0 & -0.024\,7 & -0.357\,3 \end{bmatrix}$$

在不改变视场情况下,次镜的边缘坐标为(P_X=0,P_Y=0.16),将归一化光瞳等分后取坐标(P_X=0,P_Y=0.58),分别求得穆勒矩阵与偏振度。

以入射线偏振光偏振度为 X 轴,出射线偏振光偏振度为 Y 轴建立坐标系。(H_X=0,H_Y=1)视场对应的不同口径下出射与入射线偏振光偏振度如图 3 所示。当入射光偏振度 P_{in}=0 时,所得曲线与 Y 轴的交点为没有入射光时系统对线偏振光偏振度的影响,即系统固有的对偏振度的影响。

由图 3 可知,不同光瞳位置的曲线与理想情况的曲线 y=x 相交代表着系统此时对偏振光的影响为 0,故接近线段 y=x 代表系统对偏振光影响小。P_{Y1}=0.16,P_{Y2}=0.58 和 P_{Y3}=0.10 所代表的曲线分别在点 1,点 2 和点 3 与 y=x 相交,此时系统对偏振光影响为 0;当入射光偏振度 0<P_{in}<0.090 7 时,光瞳坐标为



	X	Y
①	0.075 6	0.075 6
②	0.083 0	0.083 0
③	0.105 8	0.105 8
④	0.157 8	0.007 4
⑤	0.180 0	0.030 3
⑥	0.187 2	0.022 9

图 3 出射线偏振光偏振度与入射线偏振光偏振度关系图

Fig.3 Relationship of DoLP between emitting light and incident light

(P_{X3}=0, P_{Y3}=1)的曲线代表此光线追迹结果得出系统对偏振光的影响最大。同理在点 4，即 0.090 7<P_{in}<0.157 8 时，光瞳坐标为(P_{X1}=0, P_{Y1}=0.16)曲线代表此时系统对偏振光影响最大。点 6 即 0.157 8<P_{in}<0.187 2 时，光瞳坐标为(P_{X2}=0, P_{Y2}=0.58)的曲线代表此时系统对偏振光影响最大。0.187 2<P_{in}<1，(P_{X3}=0, P_{Y3}=1)的这条曲线代表此时系统对偏振光影响最大。由此可见，在入射光偏振度不同的情况下，不同光瞳位置的光线所得分析结果也不同，无法寻找能代表系统对偏振光影响最大的那条光线。

单根光线追迹只适用于入射光为完全偏振光来判断光学系统对偏振度的影响，当入射光为非完全偏振光时，需对系统全视场、全口径光线进行追迹。

文中基于 DDE 通信机制，利用 MATLAB 软件自动读取并修改 ZEMAX 中的各项参数，通过优化采样方式和迭代运算实现全视场全口径光线追迹，从而获取整个光学系统的偏振度变化情况。全口径、全视场光线追迹流程如图 4 所示。

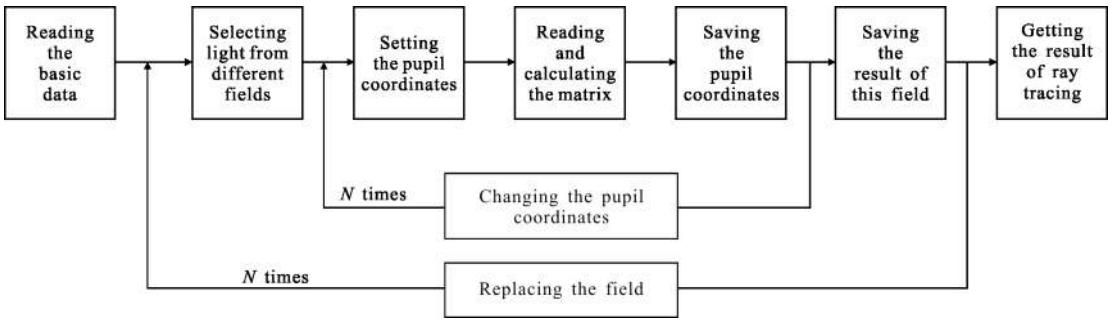
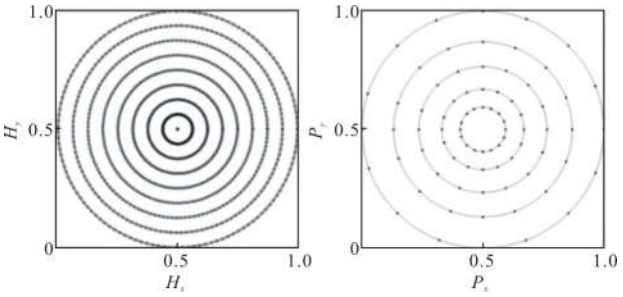


图 4 全口径、全视场光线追迹流程图

Fig.4 Flow chart of full pupil and full field ray tracing

具体步骤如下：通过动态数据连接机制在 MATLAB 中编程，读取 ZEMAX 中光学系统的基础指标。将口径和视场分别进行如图 5(a)和(b)所示的等分，并根据视场的采样点选择追迹的视场。对同一视场下的不同光瞳采样点进行光线追迹，利用光学系统折射与反射穆勒矩阵模型，根据光线追迹所得入射角、折射角和入射光斯托克斯矢量求出系统穆勒矩阵、出射光斯托克斯矢量及偏振度；更换光瞳坐

标,得到同一视场下全部光瞳坐标的光线追迹结果,求得单一视场整个口径下的偏振度。切换视场采样点下其他视场,得到全视场全口径光线的斯托克斯矢量及偏振度。



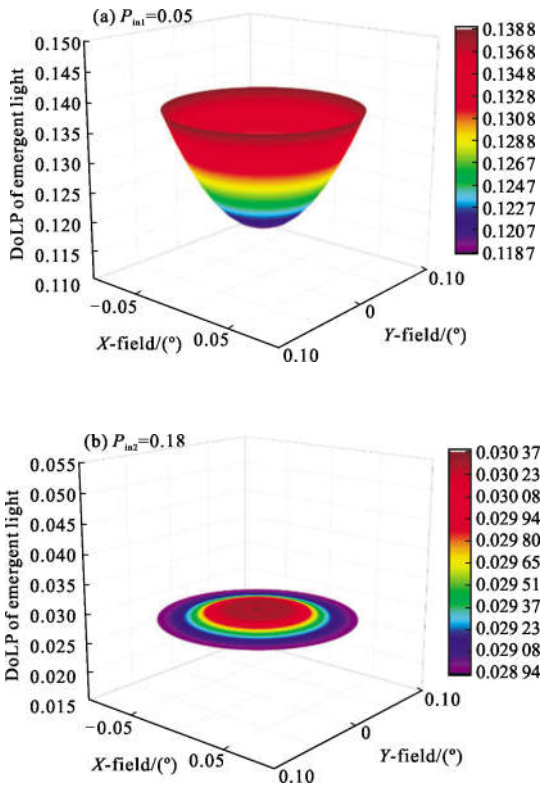
(a) 视场采样 (b) 光瞳采样

(a) Field sampling (b) Pupil sampling

图 5 视场、光瞳采样点分布图

Fig.5 Sampling point diagram of field and pupil

根据图 3 中曲线与 X 轴交点分析,由于考虑一般卫星主体与太阳能电池板偏振度都不超过 25%,且大部分在 5%左右[4],故针对 P_{in1}=0.05,P_{in2}=0.18,P_{in3}=0.03 三种情况进行追迹,得到出射线偏振光偏振度与视场的关系,X 轴、Y 轴分别为 X 方向与 Y 方向视场,Z 轴为出射光偏振度 P_{out} ,如图 6 所示。



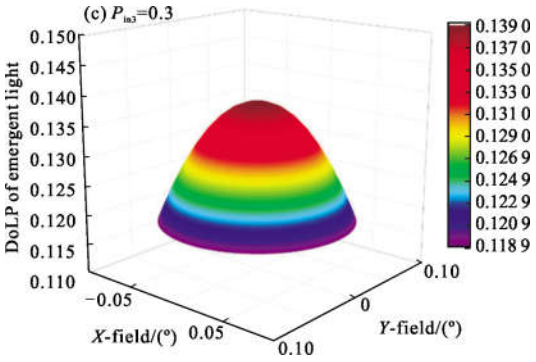


图 6 全口径全视场线偏振光偏振度图

Fig.6 DoLP of full aperture and full field

从图 6 可以直观地得到不同视场的系统影响。全口径下系统对中心视场的偏振影响要小于边缘视场,不同视场的全口径偏振度图像也成线性关系,图 6(a)示出中心视场偏振度高于入射光偏振度,所以图像开口向上,图 6(c)示出中心视场偏振度低于入射光偏振度,所以图像开口向下。与图 3 中曲线的斜率表达结果相符,斜率为负则开口向下,斜率为正则开头向上。经分析可知,同轴折反式望远系统自身会对偏振光偏振度产生影响,这个影响随着入射光偏振光偏振度增大,先减小后增大再减小,最后在入射光偏振度为 P_{in}=1 时达到最小值 0。

因中心视场出射光偏振度 P_{out} 与入射线偏振光偏振度 P_{in} 呈线性关系,通过获得探测器上中心视场的出射光偏振度 P_{out},可以确定系统的偏振度图像,再通过任意视场的出射光偏振度 P_{out},就可以确定图像的开口方向,从准备好的图像库中匹配出一样的图像,就可以通过中心视场和任意视场的 P_{out} 获取入射偏振光偏振度,从而达到斯托克斯矢量偏振成像的目的。

相比于单根光线追迹方法,全视场、全口径光线追迹方法对整个光瞳进行采样,最大限度地避免了单根光线追迹导致的偶然性,可用于分析任意入射光偏振度时光学系统对偏振度的影响,辅助系统偏振度定标。

4 结 论

文中通过对穆勒矩阵在折反射式望远系统中解析表达式的推导与分析发现,在折反系统中,若想减小系统对偏振度的影响,需减小折射反射次数,减小

次镜曲率,减小入射角与折射角差值。针对不同光瞳坐标的单根光线追迹给偏振度分析带来不确定性,文中采用全视场全口径光线追迹方法,对于折反式望远系统,得到了全视场全口径的系统穆勒矩阵,可直观展现系统对入射光偏振度的影响,从而对系统进行标定,提升测量精度。并且可以通过像面任意视场及中心视场的偏振度得出系统全口径下全视场偏振度曲线,即可匹配出对应的入射线偏振光偏振度,从而反演出目标材质与形态,实现对空间目标的偏振识别。未来还可将文中方法应用于大视场或离轴光学系统偏振特性分析。

参考文献:

[1] Klinkrad H. Space Debris: Models and Risk Analysis [M]. Berlin: Springer, 2006.

[2] Committee I-A S D C. IADC Space Debris Mitigation Guidelines [M]. [S.I.]: Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, 2002.

[3] Tan Zuojun, Li Jun, Chen Haiqing, et al. Application of polarization measurement in the identification of the space targets[J]. ***Laser & Infrared***, 2007, 37(3): 200-203. (in Chinese)

[4] Li Yanan, Sun Xiaobing, Mao Yongna, et al. Spectral polarization characteristic of space target [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(1): 206-210. (in Chinese)

[5] Gao Ming, Song Chong, Gong Lei. 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)

[6] Chipman R A, Lam W S T. The Polaris-M ray tracing program [J]. ***Polarization Science & Remote Sensing* VII**, 2016, 9613: 96130J.

[7] Wozniak W A, Kurzynowski P, Drobczyński S. Adjustment method of an imaging Stokes polarimeter based on liquid crystal variable retarders [J]. ***Applied Optics***, 2011, 50(2): 203-212.

[8] Wang Guocong, Wang Jianli, Zhang Zhenduo, et al. Polarization analysis of the telescope system used for space target polarization detection [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2014, 34(12): 1-8. (in Chinese)

[9] Zhang Ying, Zhao Huijie, Zhao Haibo, et al. Polarization aberrations analysis of reflective rotationally symmetric optical systems [J]. ***Optical Technique***, 2009, 35(3): 338-341. (in Chinese)

[10] Zhang Ying, Zhao Huijie, Xing Hui, et al. Polarization aberrations of transmitting rotationally symmetric optical systems [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2009, 17(4): 757-763. (in Chinese)

[11] Li Chunyan, Lu Weiguo, Qiao Lin, et al. Analysis and research of polarization aberration in rapid space angle measuring system [J]. ***Acta Phys Sin***, 2018, 67(3): 030703. (in Chinese)

[12] Peng Yong, Feng Bin, Shi Zelin, et al. Non-uniformity correction in polarization imaging obtained with integrated microgrid polarimeters [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(4): 0404004. (in Chinese)

[13] Liao Yanbiao. Polarization of Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003, 51-61. (in Chinese)

[14] He Si, Zhao Liwan, Wang Xia, et al. Reflection-mode controllable partially polarized infrared light source design and measurement [J]. ***Journal of Infrared and Millimeter Waves***, 2017, 36(3): 337-338. (in Chinese)

[15] Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli, et al. Photopolarimetric characteristic of space target [J]. ***Opto-Electronic Engineering***, 2010. 37(7): 24-29. (in Chinese)

[16] Zhao Yongqiang, Zhang Yuchen, Liu Wuteng, et al. Polarization imaging by micro-polarizer array [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(10): 3117-3123. (in Chinese)

[17] Zhang Z G, Dong F L, Cheng T, et al. Real-time dynamic phase measurement based on pixelated micro-polarizer array [J]. ***Sci Sin Tech***, 2015, 45: 491-497. (in Chinese)