

星载多角度偏振成像仪偏振辐射测量的理论误差分析

钱鸿鹄^{1, 2, 3}, 叶擎昊⁴, 孟炳寰^{1, 3*}, 洪津^{1, 3}, 袁银麟^{1, 3}, 裘桢炜^{1, 3}, 李双^{1, 3}

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

3. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

4. 上海卫星工程研究所, 上海 200240

摘 要 星载多角度偏振成像仪可以获取目标的多角度偏振辐射信息, 探测精度是重要的技术指标。为研究仪器的测量精度及相关的误差因素, 以 Stokes-Mueller 为数学描述方法, 分析仪器的原理和光路结构特点, 从理论上推导了仪器的偏振辐射测量模型, 并通过实验初步验证了镜头 Mueller 模型的正确性。在考虑目标光各种偏振态的情况下, 分析了非理想光学器件重要参数对目标光偏振度测量结果的影响, 得到了偏振度测量误差与通道相对透射率、空间高频相对透射率/响应率、线偏振片振透轴方位角、镜头线性双向衰减这四种参数偏差之间的关系。按照仪器探测精度要求, 结合各参数偏差对应误差最敏感的目标光偏振态, 从理论上提出了各重要参数的误差容限。该研究为整个仪器的研制、定标及后期数据处理提供了理论依据。

关键词 偏振遥感; Stokes-Mueller 矩阵; 偏振辐射测量; 偏振精度

中图分类号: TP73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)05-1558-08

引 言

偏振遥感信息包含大量与传统遥感中光谱、强度信息相独立的内容, 可以提高气溶胶、云等大气成分遥感的精度, 已成为大气光学遥感发展的一个新方向^[1-6]。这种目标探测手段和技术已成为国内外近年来研究的一个热点, 法国的 POLDER^[2, 7], 美国的 RSP, APS 和 MSP1 等偏振遥感仪器已经取得了一定的成功。国内, 中国科学院安徽光学精密机械所设计并研制了星载多角度偏振成像仪(directional polarimetric camera, DPC)^[8], 它是一种超广角画幅式低畸变成像的航天遥感偏振传感器, 可以获取大气气溶胶及云的多角度偏振辐射成像信息。偏振测量精度是衡量一台偏振探测器性能的重要技术指标, 在大气偏振特性研究中, 偏振测量精度对气溶胶参数的反演具有非常重要的意义^[9]。

仪器偏振系统误差是影响其偏振辐射测量精度的主要因素^[10], 主要包括元器件的制造误差、装调误差、视场效应等。为提高探测精度, 目前通常采用的方案是对偏振成像测量系统进行精确定标。对大视场的偏振成像仪进行偏振定标方面的研究很少, 国外仅有 Goloub 等^[11-13]的少数文献, 国

内陈立刚开展了对航空版 DPC 的实验室定标研究^[14], 一定程度上完成了包括偏振方面的实验室定标工作, 但对全视场系统性的建模及理论误差分析方面较为不足。

本文以 Stokes-Mueller(斯托克斯-米勒矩阵)为数学描述工具, 分析 DPC 的原理和光路结构特点, 从理论上推导了仪器的偏振辐射测量模型, 并通过实验验证了模型的正确性。在考虑目标光各种偏振态的情况下, 分析了非理想光学器件重要参数对目标光偏振度测量结果的影响, 得到了偏振度测量误差与通道相对透射率、空间高频相对透射率/响应率、线偏振片振透轴方位角、镜头线性双向衰减这四种参数偏差之间的关系, 同时找出了各种参数有偏差时对应误差最敏感的目标光偏振态。按照仪器探测精度要求, 以误差平均分配的方式, 结合误差最敏感的目标光偏振态, 从理论上给出了各重要参数的误差容限。该研究对于整个仪器的研制、定标及后期数据处理具有重要的理论意义。

1 DPC 原理

DPC 光学系统主要由三部分构成: 广角像方远心成像物镜、滤光片-偏振片组合转轮、面阵 CCD 探测器, 如图 1 所

收稿日期: 2016-02-24, 修订日期: 2016-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41405037), 中国科学院天文联合基金项目(U1331111)资助

作者简介: 钱鸿鹄, 1989 年生, 中国科学技术大学博士研究生 e-mail: honghu@mail.ustc.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: bhmeng@aiofm.ac.cn

示。沿轨和穿轨方向视场均为 100° ，探测阵列上有效像元数为 512×512 。转轮共有 15 个测量通道，设置了 8 个波段，其中 3 个波段是偏振（每个偏振波段有 3 个通道），5 个非偏振，另外 1 个本底通道用来测量暗电流。每个偏振测量波段，分别进行三个相对偏振方向 (0° , 60° , 120°) 的检偏测量，反演解析获得遥感偏振信息。



图 1 DPC 光学结构布局

Fig 1 Optical layout of directional polarimetric camera

遥感图像的每个像素代表对应地物目标的不同观测角度，卫星在轨运行时，轨道上不同位置可以获取同一地物目标的不同观测角度遥感数据，从而实现了多角度的观测。超广角成像物镜是此多角度观测数据的实现方式，这是仪器自身偏振效应的主要来源^[14-15]。

DPC 的光学镜头共有 12 片透镜 (20 个介质面)，对于 DPC 偏振通道，镜头之后是滤光片 + 线偏振片，最后端是接收光强的 CCD 探测器阵列，如图 2 所示。

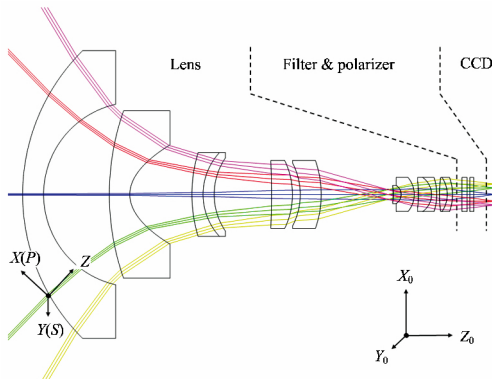


图 2 光学系统特点

Fig 2 Characteristics of the optical system

2 偏振辐射测量模型

仪器偏振辐射测量建模的目标是给出一个虚构的、完备的仪器物理描述，从而得到在每一个光谱通道中探测阵列上每一个像素单元对入射偏振光的响应特性。

2.1 Stokes 参量定义

在遥感探测中通常假定 Stokes 矢量 $S = [I, Q, U, V]^T$ 的圆偏振分量 $V = 0$ ^[16]，所以使用 I, Q, U 三个分量即可表示光束线偏振信息。其中

$$\begin{cases} I = I_{np} + I_{pol} \\ Q = I_{pol} \cos 2\chi \\ U = I_{pol} \sin 2\chi \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中， I 为辐射光的总强度， I_{np} 为非偏辐射强度， I_{pol} 为偏振辐射强度， χ 为偏振辐射的偏振角 (angle of linear polarization, AoLP)， I_{pol}/I 表示线偏振度 (degree of linear polarization, DoLP)。DPC 仪器本身对辐射光偏振态的改变可由一个 3×3 的 Mueller 矩阵^[17] 描述。

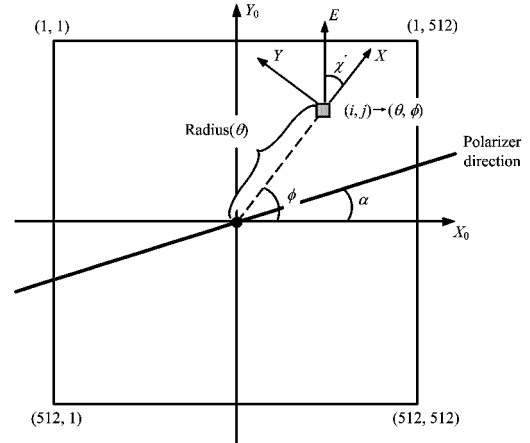


图 3 仪器坐标系中的局部坐标系和检偏器振透方向

Fig 3 Reference frames and the polarizer direction; (X_0, Y_0) for the imaging reference frame; (X, Y) for the local reference frame linked to a single pixel

2.2 镜头的 Mueller 矩阵

某一像元对应的入射光束，分解为相互正交的 P 光 (子午方向) 和 S 光 (弧矢方向)，图 2 展示了其中一个子午面。设 τ_1 和 τ_2 分别表示 P 光和 S 光的镜头振幅透射率，其只随视场角 (入射角) 的改变而变化。在平行和垂直子午面的方向建立在像面投影的局部坐标系 $O-XY$ ，如图 3 所示。单像元光束在镜头不同孔径处，每根光线与各光学表面的入射角及其入射面方位角均不同 (有一定对称性)，会导致这束光汇聚成像时发生退偏。设此退偏效应是个可忽略的小量^[18-22]，则单像元对应的镜头微元在此局部坐标系下的 Mueller 矩阵 M_{Lens} 可表示为^[23]

$$M_{Lens} = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{2} \begin{bmatrix} 1 & \epsilon & 0 \\ \epsilon & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{1 - \epsilon^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中， ϵ 是镜头的线性双向衰减^[22]，表达式为以式(3)表达

$$\epsilon = \frac{\tau_1^2 - \tau_2^2}{\tau_1^2 + \tau_2^2} \quad (3)$$

在忽略滤光片和 CCD 的偏振效应情况下，对于 DPC 非偏振通道，仪器的 Mueller 矩阵就只有镜头的 Mueller 矩阵。CCD 只响应 Stokes 矢量中的总光强 I 参量，照射到 CCD 上的光强 I_{CCD} 为式(4)

$$I_{CCD} = [1 \ 0 \ 0] \times M_{DPCnp} \times S =$$

$$[1 \ 0 \ 0] \times \mathbf{M}_{\text{Lens}} \times \mathbf{S} = \frac{(\tau_1^2 + \tau_2^2)}{2} (I + \epsilon Q) \quad (4)$$

在 CCD 响应线性区范围内, 单像元上的光强转化成显示输出的 DN(digital number)值, 其模型是

$$\text{DN} = GtAI_{\text{CCD}} + C \quad (5)$$

式(5)中, G 为 CCD 电子学增益; t 为 CCD 电子学积分时间(曝光时间); A 为对应光谱带的绝对定标系数, 单位是 $\text{DN} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{ms}^{-1}$; C 为本底暗电流。

故 DPC 非偏通道的辐射测量模型是

$$\text{DN} = GtAg(I + \epsilon Q) + C \quad (6)$$

式(6)中 g 表示此单像元路径上的整体透射率。

为验证此镜头 Mueller 矩阵模型的正确性, 开展了一组实验。用一束完全线偏光以一定视角角入射 DPC, 将入射光偏振角旋转一个周期, 观察 DPC 非偏通道相应单像元上响应 DN 值的变化规律, 如图 4 所示。入射光束 Stokes 矢量用线偏振度 DoLP 和偏振角 AoLP(χ)表示为

$$\mathbf{S} = I(1, \text{DoLP} \cdot \cos 2\chi, \text{DoLP} \cdot \sin 2\chi)^T \quad (7)$$

DoLP=1 时, 结合式(6)和式(7), 非偏通道单像元的测量模型可表达为式(8)

$$\text{DC} = Z(1 + \epsilon \cos(2\pi(\chi - \chi_0)/w)) + \text{DC}_0 \quad (8)$$

DC 是扣除本底暗电流后的 CCD 响应灰度值, DC_0 是 CCD 响应线性区不过零点的截距。

图 4 中, 黑点为单像元实验测量响应值, 红线为模型式(8)的拟合曲线, 拟合匹配度很好 (Adj. R-Square 值达到 0.999 87), 表明了镜头 Mueller 矩阵的建模是正确的。另外, 此时 ϵ 的拟合值为 0.076 1。

2.3 偏振通道辐射测量模型

DPC 偏振通道中, 镜头后面是有一定方位角的线偏振

$$\mathbf{M}_{\text{DPC}} = \mathbf{M}_{\text{LPol}(\alpha-\phi)} \times \mathbf{M}_{\text{Lens}} = \mathbf{R}_{-(\alpha-\phi)} \times \mathbf{M}_{\text{LPol0}} \times \mathbf{R}_{(\alpha-\phi)} \times \mathbf{M}_{\text{Lens}} =$$

$$\frac{(\tau_1^2 + \tau_2^2)}{2} \begin{bmatrix} 1 + \epsilon \cos[2(\alpha - \phi)] & \epsilon + \cos[2(\alpha - \phi)] & \sqrt{1 - \epsilon^2} \sin[2(\alpha - \phi)] \\ \Lambda_1 & \Lambda_2 & \Lambda_3 \\ \Lambda_4 & \Lambda_5 & \Lambda_6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

只关注矩阵相乘后的第一行参数即可, 矩阵元 Λ_{1-6} 意义不大, 此处不给出。照射到 CCD 上的光强 I_{CCD} 为式(11)

$$I_{\text{CCD}} = [1 \ 0 \ 0] \times \mathbf{M}_{\text{DPC}} \times \mathbf{S} = \frac{(\tau_1^2 + \tau_2^2)}{2} ((1 + \epsilon \cos[2(\alpha - \phi)])I + (\epsilon + \cos[2(\alpha - \phi)])Q + (\sqrt{1 - \epsilon^2} \sin[2(\alpha - \phi)])U) \quad (11)$$

所以, DPC 偏振通道全视场单像元上辐射测量模型可表示为

$$\text{DN}_{i,j}^{m,s,k,a} = G^m t^s A^k T^{k,a} g_{i,j}^{k,a} \cdot$$

$$(P1_{i,j}^{k,a} I_{i,j}^{k,a} + P2_{i,j}^{k,a} Q_{i,j}^{k,a} + P3_{i,j}^{k,a} U_{i,j}^{k,a}) + C_{i,j}^{m,s} \quad (12a)$$

式(12a)中,

$$P1_{i,j}^{k,a} = P1_{\theta,\phi}^{k,a} = 1 + \epsilon_{\theta}^k \cos[2(\alpha^{k,a} - \phi)]$$

$$P2_{i,j}^{k,a} = P2_{\theta,\phi}^{k,a} = \epsilon_{\theta}^k + \cos[2(\alpha^{k,a} - \phi)]$$

$$P3_{i,j}^{k,a} = P3_{\theta,\phi}^{k,a} = \sqrt{1 - \epsilon_{\theta}^{k^2}} \sin[2(\alpha^{k,a} - \phi)] \quad (12b)$$

标识符含义是: i, j 为像元坐标位置; m 为 CCD 电子学增益档位; s 为 CCD 电子学积分时间档位; k 为光谱波段 ($1 \leq k \leq 8$); a 为第几偏振通道 ($1 \leq a \leq 3$)。相关参数的含义是: $T^{k,a}$ 表示 k 谱段的通道相对透射率, 可将各波段偏振通道的第二

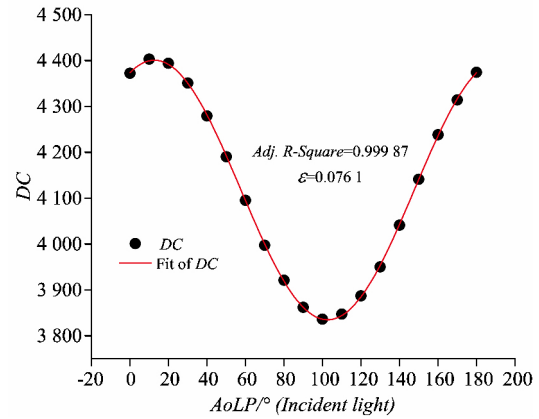


图 4 非偏通道单像元响应值及其拟合

Fig 4 Response values and fitting curve of the non-polarized channel of DPC

片。方位角为零的理想线偏振片的 Mueller 矩阵 $\mathbf{M}_{\text{LPol0}}$ 可表达为式(9)

$$\mathbf{M}_{\text{LPol0}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

理想镜头光轴方向为 $+Z_0$ 方向, CCD 像元阵列的行列方向分别为 $+X_0$ 和 $+Y_0$ 方向, 设 $O-X_0Y_0$ 为仪器坐标系。如图 3 所示, X 轴与 $+X_0$ 轴的夹角(方位角)为 ϕ , 转轮中线偏振片振透轴方向与 $+X_0$ 轴的夹角为 α 。对于各局部坐标系下的入射光束, 转轮里的检偏器有 $(\alpha - \phi)$ 的方位角。所以 DPC 偏振通道的 Mueller 矩阵为式(10)

通道作为参考基准 ($T^{k,2} = 1$); $g_{i,j}^{k,a}$ 表示全视场空间高频(像元尺度间)透射率/响应率; $P1_{i,j}^{k,a}$, $P2_{i,j}^{k,a}$, $P3_{i,j}^{k,a}$ 表示镜头和滤光/检偏单元的偏振效应。

3 误差分析

入射光偏振信息是由同一波段三检偏通道的测量解析得到, 可表达为

$$\begin{bmatrix} \text{DC}_{i,j}^{m,s,k,1} \\ \text{DC}_{i,j}^{m,s,k,2} \\ \text{DC}_{i,j}^{m,s,k,3} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{i,j}^{m,s,k} \begin{bmatrix} I_{i,j}^k \\ Q_{i,j}^k \\ U_{i,j}^k \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)中测量矩阵为式(14)

$$\mathbf{M}_{i,j}^{m,s,k} = G^m t^s A^k \cdot \begin{bmatrix} T^{k,1} g_{i,j}^{k,1} P1_{i,j}^{k,1} & T^{k,1} g_{i,j}^{k,1} P2_{i,j}^{k,1} & T^{k,1} g_{i,j}^{k,1} P3_{i,j}^{k,1} \\ T^{k,2} g_{i,j}^{k,2} P1_{i,j}^{k,2} & T^{k,2} g_{i,j}^{k,2} P2_{i,j}^{k,2} & T^{k,2} g_{i,j}^{k,2} P3_{i,j}^{k,2} \\ T^{k,3} g_{i,j}^{k,3} P1_{i,j}^{k,3} & T^{k,3} g_{i,j}^{k,3} P2_{i,j}^{k,3} & T^{k,3} g_{i,j}^{k,3} P3_{i,j}^{k,3} \end{bmatrix} \quad (14)$$

为了达到 DPC 高精度测量的目的, 需要准确定标出测量矩

阵中各参数的具体数值。入射光束用式(7)表示,反演解析得到的入射光 Stokes 参量测量值为式(15)

$$\begin{aligned} \frac{\bar{I}_{i,j}^k}{\bar{I}_{i,j}^k} \begin{bmatrix} 1 \\ \text{DoLP} \cdot \cos(2\chi) \\ \text{DoLP} \cdot \sin(2\chi) \end{bmatrix} = \\ (\bar{\mathbf{M}}_{i,j}^{m,s,k})^{-1} \times \mathbf{M}_{i,j}^{m,s,k} \times \begin{bmatrix} 1 \\ \text{DoLP} \cdot \cos 2\chi \\ \text{DoLP} \cdot \sin 2\chi \end{bmatrix} \quad (15) \end{aligned}$$

在不考虑仪器信噪比和几何畸变的情况下,由于偏振度是个相对量,对偏振度测量结果 $\overline{\text{DoLP}}$ 产生影响的主要误差来源是测量矩阵中参数 $T, g, P1, P2, P3$ 的定标误差,另外还与入射光本身的偏振度 DoLP、偏振角 χ 有关。

根据文献[12, 14]的研究结果,为不失一般性,设视场角为 46° 、方位角为 65° 的单像元(162, 458)对应的各主要参数值如表 1 所示,分析对目标光偏振度的测量误差,其中除 ϵ 外,其他参数值均可适用于其他视场角情况。

表 1 偏振辐射测量误差分析各主要参数设定值

Table 1 Setting values of some important parameters

T^1	T^2	T^3	g^1, g^2, g^3	α^1	α^2	α^3	ϵ
0.872 7	1	0.982 9	1	-26°	93°	34°	0.073 9

3.1 通道相对透射率 T 定标偏差对偏振度测量误差的影响

此种参数有三个值,由于偏振度是一相对量,可将三个定标值其中一个认定无偏差,只考虑三检偏中两个通道的相对透射率偏差即可。同时三检偏通道在偏振度测量时不区分通道顺序,故可以设两通道的参数偏差是同步的,即每一单通道的参数偏差范围一样,以第一和第二通道有偏差为例进行讨论。由于偏振度测量误差还和入射光本身的偏振度 DoLP、偏振角 χ 有关,故此时偏振度测量误差可以表示为

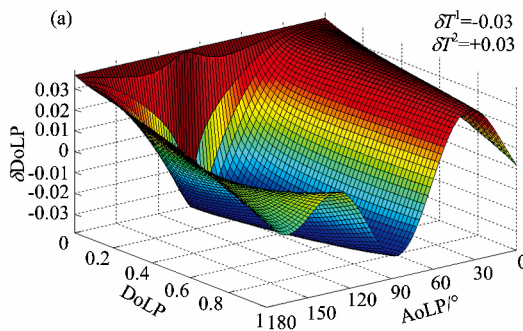


图 6 通道相对透射率有偏差时,入射光偏振度、偏振角对偏振度测量误差的影响

(a): $\delta T^1 = -0.03, \delta T^2 = +0.03$; (b): $\delta T^1 = +0.03, \delta T^2 = +0.03$

Fig 6 Theoretical measurement errors of DoLP with the DoLP and AoLP of the incident light when the relative transmission of the channel deviate

(a): $\delta T^1 = -0.03, \delta T^2 = +0.03$; (b): $\delta T^1 = +0.03, \delta T^2 = +0.03$

由图 6 可知:(1)整体上,反向偏差比同向偏差有更大的偏振度测量误差;(2)在有反向偏差的情况下,偏振度测量

$$\begin{aligned} \delta \text{DoLP} = \frac{\partial \overline{\text{DoLP}}}{\partial \overline{T^1}} \bigg|_{\overline{T^1} = T^1 + \delta T^1, \text{DoLP}, \chi} \delta T^1 + \\ \frac{\partial \overline{\text{DoLP}}}{\partial \overline{T^2}} \bigg|_{\overline{T^2} = T^2 + \delta T^2, \text{DoLP}, \chi} \delta T^2 \quad (16) \end{aligned}$$

式(16)中 δDoLP 为偏振度测量误差, $\frac{\partial \overline{\text{DoLP}}}{\partial \overline{T}}$ 为和通道相对透射率定标值 \overline{T} 、入射光偏振度 DoLP、入射光偏振角 χ 有关的偏导函数, δT 为通道相对透射率定标偏差。选择偏振度为 1、偏振角为 45° 的入射光进行分析,得到如图 5 所示结果。

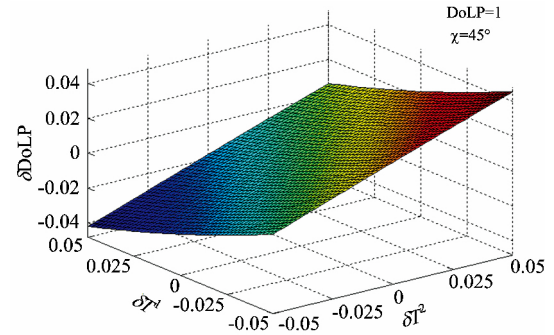
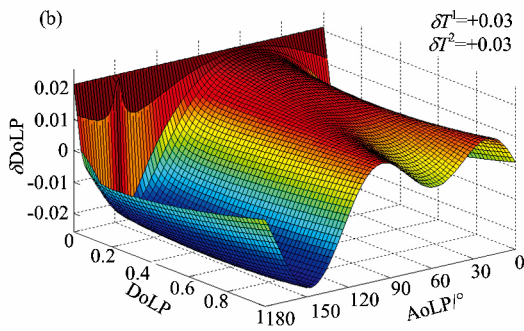


图 5 通道相对透射率偏差对偏振度测量误差的影响

Fig 5 Theoretical measurement errors of DoLP with the deviation of the relative transmission of the channels

由图 5 可知:某一固定偏振态入射光情况下,偏振度测量误差和通道相对透射率偏差之间在较小偏差范围内(如 $-0.05 \sim 0.05$)成近似的线性正比关系(求偏导时参数定标值会在偏差范围内稍有变化,故不满足严格的线性关系)。

单通道的参数偏差可以分为正向偏差和负向偏差,两个通道有偏差时可以归纳为同向偏差(同正或同负)和反向偏差(一正一负)两种情况,图 6 给出了通道相对透射率同向和反向偏差 0.03 两种情况下,入射光的不同偏振度、不同偏振角对偏振度测量误差的影响。



误差最敏感的入射光偏振态是偏振度接近 0.24、偏振角接近 21° 。结合图 5 得出的近似线性正比关系,可知在不同的反向

偏差值情况下, 偏振度测量误差随入射光偏振态的变化面形是一致的。

3.2 空间高频相对透射率/响应率 g 定标偏差对偏振度测量误差的影响

由反演解析公式可知, g 和 T 有相似的数学关系。故与 3.1 节分析方法一致, 以第一和第二通道有偏差为例, 容易分析出空间高频相对透射率/响应率的偏差和偏振度测量误差之间同样满足近似线性正比关系。另外, 在其有反向偏差的情况下, 偏振度测量误差最敏感的入射光偏振态是偏振度接近 0.39、偏振角接近 25° 。

3.3 线偏振片方位角 α 定标偏差对偏振度测量误差的影响

三检偏通道中线偏振片方位角的偏差也是影响偏振度测量精度的重要因素。方位角的相同绝对偏差不会引起偏振度测量误差, 只需考虑三检偏中两个通道的线偏振片方位角偏差即可, 同样以第一和第二通道有偏差为例进行分析, 此时偏振度测量误差可以表示为

$$\delta \text{DoLP} = \frac{\partial \overline{\text{DoLP}}}{\partial \alpha^1} \bigg|_{\alpha^1 = \alpha^1 + \delta \alpha^1, \text{DoLP}, \chi} \cdot \delta \alpha^1 + \frac{\partial \overline{\text{DoLP}}}{\partial \alpha^2} \bigg|_{\alpha^2 = \alpha^2 + \delta \alpha^2, \text{DoLP}, \chi} \cdot \delta \alpha^2 \quad (17)$$

将(17)式类比(16)式, 易知: (1)某一固定偏振态入射光情况下, 偏振度测量误差和方位角偏差成近似线性正比关系; (2)整体上两个通道线偏振片方位角的方向偏差比同向偏差有更大的偏振度测量误差。图 7 给出了在两个通道的线偏片方位角反向偏差 2° 的情况下, 不同偏振度、不同偏振角的入射光对偏振度测量误差的影响。

由图 7 可知: 在线偏振片方位角有反向偏差的情况下, 偏振度误差最敏感的入射光偏振态是偏振度接近 1、偏振角接近 148° 。

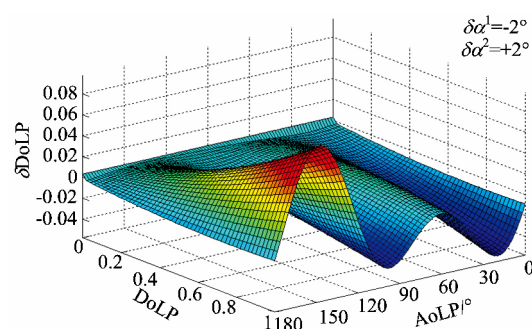


图 7 线偏片方位角有偏差时, 入射光偏振度、偏振角对偏振度测量误差的影响

Fig 7 Theoretical measurement errors of DoLP with the DoLP and AoLP of the incident light when the polarizer direction deviate

3.4 镜头线性双向衰减 ε 定标偏差对偏振度测量误差的影响

三检偏通道在分时测量时, 可近似认为同一目标在三次测量中经过 DPC 镜头的同一条路径, 即此种参数在单像元探测时可以使用一个定标值来进行计算解析。此时偏振度测量误差可以表示为式(18)

$$\delta \text{DoLP} = \frac{\partial \overline{\text{DoLP}}}{\partial \varepsilon} \bigg|_{\varepsilon = \varepsilon + \delta \varepsilon, \text{DoLP}, \chi} \cdot \delta \varepsilon \quad (18)$$

同理易知镜头线性双向衰减的偏差与偏振度测量误差也是成近似线性正比关系, 又由于一个参数值的偏差可分为正偏差和负偏差两种情况, 为寻找误差最敏感的入射光偏振态, 图 8 给出了在线性双向衰减偏差分别为 $+0.02$ 和 -0.02 情况下, 不同偏振度、不同偏振角的入射光对偏振度测量误差的影响。

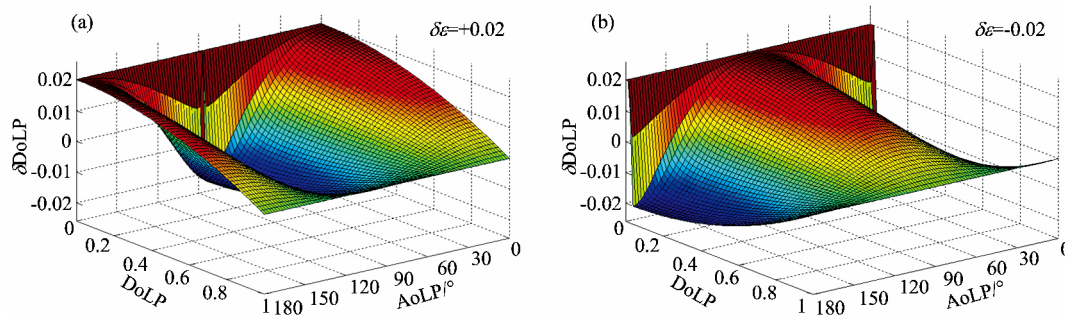


图 8 镜头线性双向衰减有偏差时, 入射光偏振度、偏振角对偏振度测量误差的影响

(a): $\delta \varepsilon = +0.02$; (b): $\delta \varepsilon = -0.02$

Fig 8 Theoretical measurement errors of DoLP with the DoLP and AoLP of the incident light when the polarization rate of the optics deviate

(a): $\delta \varepsilon = +0.02$; (b): $\delta \varepsilon = -0.02$

从图 8 中可知: 线性双向衰减有偏差时, 偏振度测量最大误差对应的入射光偏振态是非偏光。

3.5 主要参数的独立定标偏差对偏振度测量误差的影响

由以上分析可知, 各参数有偏差时, 偏振度测量最敏感误差对应着不同偏振态的入射光, 而且偏振度测量误差和各

种参数偏差之间满足近似线性正比关系, 如图 9 所示, 其中 (a), (b) 和 (c) 分别表示 T , g 和 α 的两个通道的反向同步偏差值和偏振度测量误差的关系。由图 9 可知, 若要保证偏振度测量误差在 0.02 以内, 则相应各种参数偏差的独立控制指标如表 2 所示。

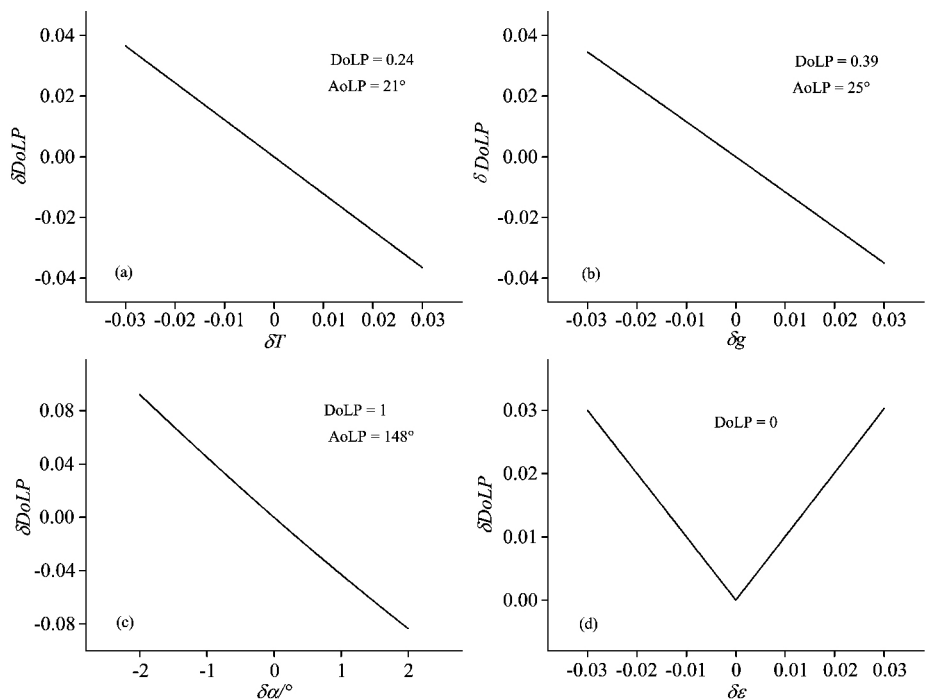


图 9 四种参数偏差与最敏感偏振态入射光的偏振度测量误差之间关系

(a): δT ; (b): δg ; (c): $\delta \alpha$; (d): $\delta \epsilon$

Fig 9 Theoretical measurement errors of DoLP corresponding the most sensitive incident lights with the deviatons of four kinds of parameters

(a): δT ; (b): δg ; (c): $\delta \alpha$; (d): $\delta \epsilon$

表 2 各主要参数偏差值独立控制指标
(偏振度测量误差 0.02)

Table 2 The independent tolerances of the parameters ensuring the theoretical measurement error of DoLP is less than 0.02

参数	参数预设值	入射光偏振态	参数偏差
T	$T^1=0.8727$	DoLP=0.24 AoLP=21°	$-0.0163 \leq \delta T \leq 0.0163$
	$T^2=1$		
	$T^3=0.9829$		
g	$g^1=1$	DoLP=0.39 AoLP=25°	$-0.0172 \leq \delta g \leq 0.0172$
	$g^2=1$		
	$g^3=1$		
α	$\alpha^1=-26^\circ$	DoLP=1 AoLP=148°	$-0.445^\circ \leq \delta \alpha \leq 0.445^\circ$
	$\alpha^2=93^\circ$		
	$\alpha^3=34^\circ$		
ϵ	0.0739	DoLP=0	$-0.0199 \leq \delta \epsilon \leq 0.0199$

表 2 给出的各参数偏差控制范围均是对应各自最敏感的入射光偏振态,其他偏振态入射光的结果在此分析评估误差之下。

3.6 各主要参数定标偏差的分配

本研究涉及四种参数的偏差,按照误差平均分配的方式,见式(19)

$\delta DoLP = \sqrt{(\delta DoLP_T)^2 + (\delta DoLP_g)^2 + (\delta DoLP_\alpha)^2 + (\delta DoLP_\epsilon)^2}$ (19)

每种参数偏差的容限应该缩小到其独立偏差容限的一半时,其各参数偏差导致的合成后误差才能保证和单参数独立偏差导致的误差一致。

根据实际地物反射光的特点和 DPC 研制任务书的要求,偏振测量精度需要对偏振度为 0~0.3 范围内的目标观测偏振度误差控制在 0.02 以内。由于只研究了四种主要的参数,没有研究其他忽略的因素(如镜头表面膜系的偏振特性、光束的退偏、CCD 本身的偏振特性、杂光),故假设给这四种参数的总精度指标在 0.016 以内。根据以上的分析结果,在此范围内分别取最敏感的四目标光进行误差的分配,如表 3 所示。

表 3 各主要参数偏差值分配后控制指标(偏振度测量误差 0.016)

Table 3 The dependent tolerances of the parameters ensuring the theoretical measurement error of DoLP is less than 0.016

参数	入射光偏振态	参数偏差
T	DoLP=0.24, AoLP=21°	$-0.0065 \leq \delta T \leq 0.0065$
g	DoLP=0.3, AoLP=25°	$-0.0069 \leq \delta g \leq 0.0069$
α	DoLP=0.3, AoLP=148°	$-0.86^\circ \leq \delta \alpha \leq 0.86^\circ$
ϵ	DoLP=0	$-0.0079 \leq \delta \epsilon \leq 0.0079$

综上所述,若本研究的四种参数引起的误差在 0.016 以内,则平均分配后的各参数的误差容限分别是:单通道相对

透射率误差容限为 ± 0.0065 ，空间高频相对透射率/响应率误差容限为 ± 0.0069 ，单通道线偏片方位角误差容限为 $\pm 0.86^\circ$ ，镜头线性双向衰减误差容限为 ± 0.0079 。

4 结 论

通过分析 DPC 光学系统的特点，推导并建立了 DPC 偏振辐射测量模型，并通过实验验证了模型的正确性。对于某一视场角的单像元，在考虑了目标光各种偏振态的情况下，分析了模型中主要参数定标偏差对偏振度测量误差的影响，得到了偏振度测量误差与通道相对透射率 T 、空间高频相对透射率/响应率 g 、线偏片方位角 α 、镜头线性双向衰减 ε 这四种参数偏差均成近似线性正比关系，同时找出了四种参数有偏差时对应误差最敏感的目标光偏振态。按照仪器的偏振探测精度要求，设这四种参数引起的误差指标在 0.016 以内，以误差平均分配的方式，结合各自对应误差最敏感的目标

光偏振态，从理论上给出了四种重要参数的误差容限。为后期仪器定标时的定标方法精度和外围设备性能指标提出理论要求，从而为 DPC 的研制、仪器定标等精度需求和数据处理提供了理论参考依据。本研究虽针对多角度偏振成像仪，但该误差分析方法对其他涉及到透射率、方位角、偏振效应等因素的偏振测量系统同样具有一定的适用性。

对于其他视场角的像元，镜头 ε 值会有变化，但各项参数的分析方法仍然奏效。同时本研究结果是在如表 1 中的参数设定值情况下分析得到的，若实际研制后各项参数值不同于此设定值，则参数对应的误差最敏感入射光偏振态会与此不同，但整体上的参数误差容限仍具有一定代表性。

同样存在一定的局限性，在该理论分析中，认为转轮中线偏振片是理想的，另外，没有考虑 CCD 本身的偏振效应、非线性，仪器内的杂光，光学介质表面膜系的偏振特性，光学系统的退偏等这些因素。

References

- [1] GUO Hong, GU Xing-fa, XIE Dong-hai, et al(郭红, 顾行发, 谢东海, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2014, 34(7): 1873.
- [2] Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32: 598.
- [3] Breon F M, Tanre D, Lecomte P, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33: 487.
- [4] XIE Dong-hai, GU Xing-fa, CHENG Tian-hai, et al(谢东海, 顾行发, 程天海, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2012, 61: 077801.
- [5] GU Xing-fa, CHEN Xing-feng, CHENG Tian-hai, et al(顾行发, 陈兴峰, 程天海, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2011, 60: 070702.
- [6] Li Z Q, Blarel L, Podvin T, et al. Applied Optics, 2010, 49: 1249.
- [7] Andre Y, Laherrere J M, Bret-Dibat T, et al. Proceedings of SPIE, 1995, 2572: 79.
- [8] YANG Wei-feng, HONG Jin, QIAO Yan-li(杨伟锋, 洪津, 乔延利). Acta Optica Sinica(光学学报), 2015, 35: 0822005.
- [9] Diner D J, Chipman R A, Beaudry N, et al. Proceedings of SPIE, 2005, 5659: 88.
- [10] HOU Jun-feng, WU Tai-xia, WANG Dong-guang, et al(侯俊峰, 吴太夏, 王东光, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2015, 64: 060701.
- [11] Goloub P, Toubbe B, Herman M, et al. Proceedings of SPIE, 1997, 2957: 299.
- [12] Bret-Dibat T, Andre Y, Laherrere J M. Proceedings of SPIE, 1995, 2553: 218.
- [13] Hagolle O, Goloub P, Deschamps P Y, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 1550.
- [14] CHEN Li-gang, MENG Fan-gang, YUAN Yin-lin, et al(陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等). Journal of Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 2011, 22: 1629.
- [15] Sen A K, Kakati M. Astronomy Astrophysics Supplement Series, 1997, 126: 113.
- [16] Leroy M, Deuze J L, Breon F M, et al. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997, 102: 17023.
- [17] CHEN Li-gang, MENG Fan-gang, YUAN Yin-lin, et al(陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2010, 5: 227.
- [18] Maymon P W, Chipman R A. Proceedings of SPIE, 1992, 1746: 148.
- [19] Chipman R A. Optical Engineering, 1989, 28: 90.
- [20] Chipman R A. Proceedings of SPIE, 1999, 3754: 14.
- [21] Chipman R A. Applied Optics, 2005, 44: 2490.
- [22] Nee S-M F. Applied Optics, 2006, 45: 6497.
- [23] Shintani R, FAN Ai-ying, KANG Chang-he(新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤). Polarized Light(偏振光). Beijing: Atomic Energy Press(北京: 原子能出版社), 1994.

The Polarized Radiometric Theoretical Error of Spaceborne Directional Polarimetric Camera

QIAN Hong-hu^{1, 2, 3}, YE Qing-hao⁴, MENG Bing-huan^{1, 3*}, HONG Jin^{1, 3}, YUAN Yin-lin^{1, 3}, QIU Zhen-wei^{1, 3},
LI Shuang^{1, 3}

1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

4. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China

Abstract The measurement accuracy is an important technical index of the Spaceborne Directional Polarimetric Camera which achieves multiangle polarimetric information in target detection. In order to research the elements affecting the measurement accuracy of the instrument, the polarized radiometric theoretical model of every single pixel of the instrument which contains parameters representing physical concept clearly is established in steps by using mathematical description called Stokes-Muller and analyzing characteristics of the instrumental optical structure. The theoretical measurement errors of Degree of Linear Polarization on a single pixel, introduced by some important parameter deviations of all the components in the instrument, is calculated and analyzed. The results shows that there might exist proportional relationship between the theoretical measurement errors of Degree of Linear Polarization and the deviation of the relative transmission of the channels, the deviation of the high frequency part of the spatial variation of the transmission mainly due to the inter-pixel sensitivity variation, the deviation of the orientation of the polarizer, the deviation of the polarization rate of the optics. When the deviations of the parameters exist, the theoretical measurement errors of Degree of Linear Polarization affected by the different kinds of incident light are acquired. According to the measurement accuracy of the instrument, the tolerances of the parameters are proposed for the most sensitive kinds of incident lights by the way of equal distribution of the errors. The study provides a theoretical basis and practical guidance for the development, calibration and data post-processing of the Directional Polarimetric Camera.

Keywords Polarization remote sensing; Stokes-Mueller; Polarized radiometry; Polarimetric error

(Received Feb. 24, 2016; accepted Jun. 18, 2016)

* Corresponding author