

多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标*

顾行发¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 陈兴峰^{1)2)3)†} 程天海¹⁾²⁾³⁾ 李正强¹⁾²⁾⁴⁾ 余涛¹⁾²⁾³⁾ 谢东海¹⁾²⁾³⁾ 许华¹⁾²⁾⁴⁾

1) (遥感科学国家重点实验室,中国科学院遥感应用研究所,北京 100101)

2) (中国科学院研究生院,北京 100049)

3) (国家航天局航天遥感论证中心,北京 100101)

4) (国家环境保护卫星遥感重点实验室,北京 100101)

(2010年6月2日收到;2010年9月30日收到修改稿)

为了做好卫星数据应用的技术储备,多角度偏振遥感相机 DPC 航空预研版已经研制成功并完成了航空飞行实验. DPC 相机用于获取地气系统反射的偏振、多角度的太阳辐射信息,其地气物理参数反演依赖于定标的精度. 偏振相机的辐射定标包括强度和偏振两个方面. 本文研究偏振遥感相机的偏振参数的在轨定标原理与方法. 基于偏振遥感相机的设计原理,以相机的偏振辐射模型为基础,探索偏振定标的原理和方法. 使用 DPC 航空遥感实验数据,初步实现了在轨偏振定标并对定标结果进行了分析. 为将来我国自主星载偏振遥感数据处理和在轨偏振定标提供理论基础.

关键词: 偏振定标, 遥感, 在轨定标, DPC

PACS: 07.07.Df, 42.68.Wt, 43.28.We

1. 引言

气溶胶自身对太阳辐射因散射和吸收作用对气候产生直接影响,并且与云相互作用对气候产生间接影响. 这两个因素导致气溶胶对气候起着不可忽视的作用. DPC (directional polarized camera) 相机的最主要任务是通过偏振和强度信息探测气溶胶. 偏振在微波遥感中叫做极化,是电磁波作为三维横波的一种矢量特性. 研究基础表明,增加了偏振信息的遥感大气探测可以获得更高的精度^[1,2],对于云相态等物理参数探测提供较高的精度^[3,4],并且可以提供大量独立于光谱和强度的信息^[5]. 法国的偏振传感器 POLDER 于 1996 年 8 月搭载日本 ADEOS 卫星发射成功,共三次发射,最终成功在轨运行,之后国际上一直没有第二个同类型传感器上星.

国内,中科院安光所对偏振遥感相机进行了设计并研制成功. 中科院遥感所于 2006 年开展多角

度多光谱偏振遥感相机的论证工作,使用安光所研制的 DPC 相机,通过 2008 年青岛、2009 年中山两次航空遥感实验获取的实验数据,完善并检验地面处理系统的几何数据处理、辐射定标、偏振定标等预处理模块的能力,训练地气解耦^[6]和气溶胶光学特性、云物理特性反演的算法.

国际定标组织尚未给出偏振定标的定义,按照定标内容的划分^[7],遥感传感器的定标可以分为光谱、几何、辐射三个方面,偏振定标即对传感器系统中各部分影响矢量辐射传输的物理参数进行定标^[8],所以偏振定标和强度定标共同构成辐射定标. 偏振定标的精度决定了偏振遥感信息反演的精度,然而,偏振定标理论一般要比强度定标复杂得多,实现也更困难^[5]. 光学在轨偏振相机国外只有 POLDER 传感器一个先例,POLDER 关于强度信息的在轨定标进行了广泛的研究,但是偏振定标领域仅有 Golube^[9-11]等人的极少数文献. 其中,文献 [11] 对利用太阳耀光进行在轨偏振定标的理论进行了分析. 陈立刚^[8]开展了宽视场航空偏振成像仪

* 国防科技工业民用专项科研技术项目(批准号:KJSX0601 和 07K00100KJ)和国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA121501-2)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: chenxf@irsa.ac.cn

的实验室定标研究,系统地完成了包括强度和偏振两个方面的实验室定标工作,并且最后展望了利用自然景物的在轨定标.

定标,最终的目的是得到定标系数^[12],DN 值是仪器对光强的响应,强度定标从 DN 值到定标系数的公式非常简单,最复杂的工作是获得传感器的入瞳辐亮度,也就是计算定标光源的输出值,这在实验室通常使用积分球等标准光源来实现,通过光谱仪可以测量标准光源的辐亮度.但是,在轨定标如果没有星上定标器,需要选择合适的自然场景做替代定标,其“标准光源”需要经过复杂的辐射传输计算才能得到,增加了偏振信息之后,在轨偏振定标的计算过程更复杂.

本文研究了在轨偏振定标原理及方法.首先介绍了 DPC 相机的系统结构,根据其结构分析了影响偏振辐射传输的物理参数,推导了偏振成像仪的辐射模型.根据待定标参数的自身特点,选取特殊的自然场景进行定标方法研究,最后将定标方法应用在 DPC 相机的航空遥感实验数据上,并把在轨定标初步结果和实验室定标结果进行了对比.

2. DPC 传感器及其特点

DPC 是一个偏振成像仪,其目标是获取地气系统反射的多光谱、多角度、偏振辐射信息,相机由三部分构成:CCD 矩阵(1024 × 1024)探测器,滤光片-偏振片(检偏器,以下称为偏振片)组合转轮和宽视场光学系统.

其特点和原理如下.

2.1. 多光谱

DPC 偏振成像仪共设置了 6 个波段获取对地观测数据,其中 3 个波段是偏振的,3 个非偏,另外有 1 个用于测量暗电流的本底通道(本文公式中使用的 DN 值都是去除了暗电流之后的),每个偏振波段有 3 个通道,共 13 个通道.其光谱段有(单位: nm; P 代表偏振):495P,665P,865P,550,780,810. 波段设置定位于监测气溶胶、云、海洋.

2.2. 多角度

地物对入射太阳光的反射具有各向异性的特点^[13],方向性是定量遥感面临的一个重要问题,获取多个角度对同一地物的观测数据有利于提高定

量遥感精度. DPC 传感器根据轨道高度(或航高) A ,视场角 V ,飞行速度 S ,拍摄时间间隔 T 等可以确定同一地物被观测的次数 N 为

$$N = \frac{2A \tan \frac{V}{2}}{13ST}, \quad (1)$$

其中,13 代表 DPC 一个拍摄周期包含的通道数.(1)式可知,同一地物被观测次数与视场角一半的正切、轨道高度成正比,与飞行速度和拍摄时间间隔成反比.所以 DPC 被设计为宽视场光学系统,沿幅宽方向视场角 $V = 60^\circ$, T 由 CCD 特性和数据采集卡速率决定,最小可以设置为 0.675 s. 航空遥感实验中,飞行平台平均地速约为 230 km/h,4 km 航高时,DPC 单航带可获取 8 个角度观测结果. DPC 飞行获取多角度数据示意如图 1.

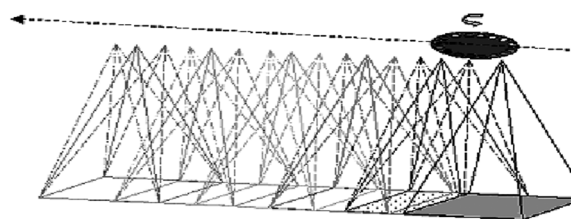


图 1 宽视场 DPC 相机获取多角度数据

2.3. 偏振

电磁波偏振的描述方法有三角函数法、Jones 矢量法、Stokes 矢量法、图示法等,偏振态的传递通常使用穆勒矩阵描述.遥感中通常使用 Stokes 矢量法^[14] $V = [I, Q, U, V]^T$ (T 表示矩阵转置). I 表示总辐射强度, Q 表示平行或垂直于参考平面的线偏振的强度, U 表示与参考平面成 45° 角上的线偏振的强度, V 表示圆偏振强度.由于地物反射的太阳光中的圆偏振分量很小,一般取 $V = 0$ ^[15],使用三个 Stokes 分量 I, Q, U 表示即可.根据文献[16]的推导,某偏振通道的探测器所获得的亮度可以描述为

$$I_\alpha = \frac{1}{2}(I_0 + Q_0 \cos 2\alpha + U_0 \sin 2\alpha), \quad (2)$$

α 是偏振片在 DPC 相机中安装的角度,三个通道分别是 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$,使用三个不同角度的通道进行观测 I_α ,就可以联立方程组解出入瞳光的偏振态 $[I_0, Q_0, U_0]^T$.

3. 偏振测量原理和辐射模型

令 I 为相机的入瞳总辐亮度, I_{pol} 为偏振辐亮度,

χ 为入射光的偏振角.

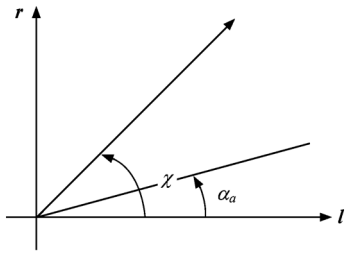


图2 偏振角 χ 和偏振片安装角 α_a

入瞳辐亮度分为线偏振 I_{pol} 和非偏 I_{nat} 两部分:

$$I = I_{\text{nat}} + I_{\text{pol}}. \quad (3)$$

假设镜头、滤光片和偏振片为理想元件,那么,DPC 偏振通道所获得的 DN 值为

$$\text{DN}_a = A \left[\frac{I_{\text{nat}}}{2} + I_{\text{pol}} \cdot \cos^2(\chi - \alpha_a) \right], \quad (4)$$

A ($\text{DC}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$) 是绝对辐射定标系数,代表 DN 值和辐亮度之间的关系;非偏光 I_{nat} 经过理想偏振片之后,能量变为原来的一半;线偏振光 I_{pol} 经过偏振片之后, χ 代表线偏振光的振动方向, α_a 代表偏振片允许通过的方向,其电场矢量的强度变为原来的 $|\cos(\chi - \alpha_a)|$ 倍,辐亮度和电场强度的平方成正比,所以非偏光的辐亮度变为 $I_{\text{pol}} \cdot \cos^2(\chi - \alpha_a)$.

现实模型加入了以下参数:

p , 光学镜头低频部分的相对透过率,因为不同视场的透过率不同而导致成像不均匀,是视场角 θ_v 的函数,每个像元的视场角可由像素位置 (i, j) 来计算, $p(0) = 1$.

ε , 光学镜头起偏度,是视场角 θ_v 的函数,通过多项式拟合可以得到函数 $\varepsilon(\theta_v)$.

η , 偏振片的透过率,与视场角无关,一般认为偏振片是空间均一的,通常取为常数.

T_a , 滤光片-偏振片组合的平均相对透过率. DPC 每一个偏振波段有不同偏振片安装角度的 3 个通道 $a = 1, 2, 3$, 理想情况下,它们的绝对辐射定标系数 A 应该是相同的,但是实际上有一定的差别, DPC 定标只给出第二个通道 ($a = 2$) 的绝对辐射定标系数 A , 在 $a = 1, 3$ 时都使用同一个 A , 然后通过 A 和 T_a ($a = 1$) 相乘来替代该通道的绝对辐射定标系数. 使用 A 和 T_a 的方法和使用 A_a ($a = 1, 2, 3$) 是等效的. 通常认为滤光片-偏振片组合透过率空间均一, 所以 $T_a = \overline{t_a/t_2}$, t_a 是第 a 通道的平均透过率, $T_2 = 1$.

根据 Stokes 各分量的光学传递原理,可以推导出现实模型^[10]:

$$\text{DN}_a = ApT_a(p_{1(\theta)}I + p_{2(\theta)}Q + p_{3(\theta)}U), \quad (5)$$

其中

$$p_{1(\theta)} = 1 + \eta\varepsilon(\theta)\cos 2\alpha_a,$$

$$p_{2(\theta)} = \varepsilon(\theta) + \eta\cos 2\alpha_a,$$

$$p_{3(\theta)} = \eta\sin 2\alpha_a, \quad (6)$$

$$I = I, Q = I_{\text{pol}}\cos 2\chi, U = I_{\text{pol}}\sin 2\chi, \quad (7)$$

偏振参数是 ε, η, T_a 偏振定标的重点.

4. 在轨定标方法

偏振定标需要较为复杂的定标系统,一般难以在飞行平台上实现,只能使用场景替代定标的方法. 戈壁、沙漠等场景具有大范围的地势平坦、地表均一、方向特性好等特点,在无云并且空气干洁的天气可以获得绝对辐射定标系数 A , 同理也可以获得光学系统的低频相对透过率 p .

偏振参数 ε, η, T_a 的定标需要使用偏振特征明显的目标:非偏振目标比如云,强偏振目标比如海表太阳耀光.

4.1. 云场景定标

偏振反射率是反射率与偏振度的乘积,是卫星(航空)偏振仪遥感数据的一种产品,偏振反射率为 0 的前提下, $Q = U = 0, I_{\text{pol}} = 0$, 偏振度 $P = 0$, 所以 DPC 相机的现实模型简化为

$$\text{DN}_a = ApT_aI(1 + \eta\varepsilon(\theta)\cos 2\alpha_a). \quad (8)$$

使用云场景定标主要是利用它在特定观测条件下的非偏振特性,可以获得 ε, T_a 两个参数. 水云等目标散射光,在特定观测条件下,具有非偏振的特点,通过模拟可以得到水云的粒子偏振反射率. 在 100° 散射角,会发生偏振反射率为 0 的现象^[17]. 但是 0 偏振的形成需要严格的观测条件:需要选择海洋上空的云层,以减少地表干扰;选择大面积的厚云,可以使云覆盖整幅遥感图像.

根据 T_a 的定义,可以通过大面积厚水云的整幅图像观测法来获得:

$$T_a = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \left(\frac{DC_a(i,j)}{1 + \eta\varepsilon\cos 2\alpha_a(i,j)} \times \frac{1 + \eta\varepsilon\cos 2\alpha_a(i,j)}{DC_2(i,j)} \right)$$

$$\approx \frac{1}{N} \sum_{i,j} \left(\frac{DC_a(i,j)}{DC_2(i,j)} \right). \quad (9)$$

使用约等于,是因为两个不同通道的 η 可视为相同的,这些偏振片来自于同一个产品批次,认为具有相同的参数. 在求平均值之后 η 造成的影响可以忽略.

获取散射角为 100 度的图像的 DN 值,偏振度 P 的值可以通过 DN 值来计算并且不为零,是因为光学镜头的起偏作用造成的,把 $\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 60^\circ, \alpha_3 = 120^\circ$ 代入(8)式,可以精确给出光学系统的起偏度和偏振片透过率的乘积 $\eta\varepsilon$,即

$$\eta\varepsilon = \frac{2\left(\frac{DN_1}{T_1} - DN_2\right)}{2DN_2 + \frac{DN_1}{T_1}} = \frac{2\left(\frac{DN_3}{T_3} - DN_2\right)}{2DN_2 + \frac{DN_3}{T_3}}. \quad (10)$$

实际上,偏振片的透过率 η 具有很好的稳定性,可以使用实验室定标结果,代入(10)式获得光学镜头起偏度.

光学镜头起偏度是视场角的函数. 散射角等于入射方向和散射方向的夹角,而散射方向取决于传感器的观测方向,如果是航空遥感实验,太阳入射角是一定的(航空遥感覆盖范围小,入射角变化很小),如果传感器的姿态不变,只有一圈特定视场角的像元能够满足散射角等于 100° ,为了实现 $\varepsilon(\theta_v)$ 定标,需要不同太阳高度角的观测条件,航空遥感实验要根据太阳的高度角要求合理设计数据获取时间.

4.2. 海表太阳耀光定标

理想的水面可视为一个镜面,根据反射定律,逆着反射光线的方向观测,可以观测到太阳耀光. 而真实的海洋表面,具有大范围的波浪坡度分布,更容易产生太阳耀光,在航空遥感^[18]、卫星遥感^[19]中通常视为噪声. 当光线以布儒斯特角入射时,反射光线是偏振度 $P = 1$ 的完全线偏振光,振动方向与入射面垂直. 海洋耀光可以作为偏振定标的强偏振替代光源.

偏振定标需要确定大气顶层(TOA)的向上辐亮度和偏振度. 大量文献研究了海气耦合系统的辐射传输模型^[20,21]. 本文使用 Cox 和 Munk 模型描述海表场景,使用逐次散射法模型 6SV 计算大气矢量辐射传输.

Cox 和 Munk^[22,23]建立了仅使用风速风向描述

的海浪斜坡分布的统计模型,是 50 多年以来海洋辐射传输研究广泛使用的海表场景模型,使用 Snell-Fresnel 定律计算反射系数,(11)式可以得到方向反射率

$$\rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \frac{\pi P(Z'_x, Z'_y) R(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)}{4 \cos(\theta_s) \cos(\theta_v) \cos^4(\beta)}, \quad (11)$$

$\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v$ 分别代表太阳、观测的天顶角和方位角, $R(n, \theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v)$ ^[24]是 Fresnel 反射系数, n 是海水的复折射指数 $n = n_r - n_i$. $P(Z'_x, Z'_y)$ 是用于描述海浪斜坡分布的 Gram-Charlier 展开式,详见文献[22, 23].

选用 6SV (second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector) 矢量辐射传输模型^[25]计算白色泡沫、离水辐亮度、太阳耀光及水面上界的大气辐射传输,6SV 可以计算表观反射率、表观偏振反射率以及 TOA 处的偏振度. 其模型可以近似描述如下:

$$\rho \cong (\rho_g + \rho_w + \rho_f) e^{-M\delta} + \rho_m + \rho_a, \quad (12)$$

$$\rho^{\text{pol}} \cong \rho_g^{\text{pol}} e^{-M\delta} + \rho_m^{\text{pol}} + \rho_a^{\text{pol}}, \quad (13)$$

$$P = \rho^{\text{pol}} / \rho. \quad (14)$$

其中, ρ 和 ρ^{pol} 分别是表观反射率和表观偏振反射率, ρ_m 和 ρ_m^{pol} 对应分子散射, ρ_a 和 ρ_a^{pol} 对应气溶胶散射, ρ_g, ρ_w, ρ_f 分别是太阳耀光、离水辐亮度和白色泡沫的反射率, M 是空气质量因子, δ 是大气总光学厚度. 如果风速不大于 10m/s, 白色泡沫的贡献可忽略^[11], 同样,与太阳耀光相比较,离水辐亮度在可见—近红外波段可忽略,故表观偏振度可以简化为

$$P \cong \frac{\rho_g P_g e^{-M\delta} + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{\rho_g e^{-M\delta} + \rho_m + \rho_a}, \quad (15)$$

P_g, P_m, P_a 代表相应的偏振度.

利用矢量辐射传输模型精确计算大气辐射传输,需要输入最接近真实情况的气溶胶微物理参数,也即使用自定义气溶胶模式. 气溶胶模式包括复折射指数 m 和粒子数谱分布函数 dN/dr , 使用偏振太阳光度计 CE-318DP 进行观测,可以反演得到以上参数^[26], 6SV 支持用户输入粒子体积谱 $dV/d\ln r$ 的观测值序列,最多可以输入 50 组数据. 粒子数谱和体积谱是不同的,但是具有固定的转换关系^[27]

$$\frac{dV}{d\ln r} = \frac{4}{3} \pi r^4 \frac{dN}{dr}. \quad (16)$$

结合海表的 Cox 和 Munk 场景模型,通过计算 Snell-Fresnel 公式,再耦合大气辐射传输模型 6SV,

可以精确计算太阳耀光的偏振反射率和偏振度. 用于偏振观测结果的质量控制.

4.3. 误差分析和可行性

关于云场景,需要仔细选择地面辐射贡献极小的厚水云,辐射方面:地面辐射等因素造成的辐射噪声(暗电流已经被减掉)在求算 ϵ, T_a 的取平均过程中会被平滑掉,这个影响可以忽略;几何方面:因为 DPC 相对于摄影测量相机来说空间分辨率较低,几何配准的相对误差更小,对于大面积均一的厚云来说,同样可以在计算多个像元取平均的过程中消掉;另外,云层以上的分子吸收和瑞利散射也会对偏振信息产生影响,需要消除,在 865 nm 波段,分子吸收计算会引入 0.02% 的误差,瑞利散射计算会引入 10^{-4} 的误差;实际选取零偏振像元时,只是根据水云的偏振辐射特性仿真的结果去寻找散射角为 100° 附近的多数像元,视为偏振度为零,有可能会引入系统误差.

云场景对于 T_a 的计算较为简单,引入的误差较小,但是对于 ϵ 的计算需要精确的零偏振条件,需要考虑瑞利散射和气体吸收的影响.

海洋耀光偏振度,通常用来检验偏振仪所观测到的偏振度产品的质量,因为强偏光可以对偏振片的透过率 η 定标,但是 η 的实验室定标精度 (0.1%) 非常高,并且该参数可以保持长期的稳定性,通过海表的 Cox 和 Munk 模型耦合大气辐射传输模型计算得到的海洋耀光偏振度(精度最高能达到 0.5%^[11])不满足 η 定标精度要求,通常用来检验偏振度产品的正确性. 偏振度的计算包含了多个定标参数,这个检验的过程可以称为全局质量控制.

5. DPC 在轨定标实验

为了验证 DPC 相机的几何预处理、定标和气溶胶反演算法,在广东中山沿海地区开展了航空遥感实验. 使用上述的定标方法实现轨偏振定标,与实验室定标进行了对比,实验室定标结果被认为是正确的^[8].

关于云定标,遥感图像中的被识别为云的像元需满足以下条件:1) 反射率大于 0.2;2) 大范围均一,要求辐亮度相对标准差(标准差除以平均值)小于 0.1;3) 散射角在 90° 至 100° 区间之内. 经过从 333 幅有云的图像中挑选出符合条件的 39 幅,得到

的在轨定标结果与实验室结果比较如表 1.

表 1 490 nm 波段相对透过率 T_a

	实验室定标	云定标	误差/%
T_1	0.8621	0.8713	1.0
T_3	0.9175	0.9221	0.5

相对透过率的计算达到了较高的精度,因为实验获取的云图像无法精确地得知云层厚度,云的辐射信息受到地面干扰所引入的误差无法定量给出,所以没有做光学系统起偏度的定标. 如果实验获取的云图像严格符合上述 3 个条件,定标的精度还可以提高.

TOA 处的海洋耀光偏振度基于 6SV1.1 辐射传输模型计算. 为了严格计算气溶胶对表观辐亮度、表观偏振辐亮度的影响,使用偏振太阳光度计观测的光学厚度(太阳光度计波段设置不包括 550 nm,通过等效计算得到光学厚度),粒子谱分布和复折射指数^[28].

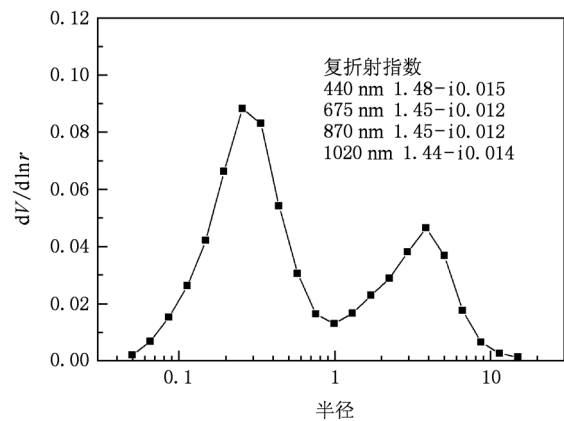


图 3 利用太阳光度计观测数据反演的粒子谱分布(体积谱)和复折射指数

每个像素的太阳几何包括太阳的天顶角和方位角,通过时间和经纬度可以精确计算,传感器观测几何由高精度的 POS (position and orientation system) 测量的外方位元素结合相机本身的内方位元素和视场角,选择热带冬季的大气模式,模拟得到的偏振度和 DPC 观测的偏振度(通过实验室定标结果计算得到)进行比较(表 2).

通过大量的观测求平均,偏振度的反演精度能够达到 1%^[11],表 2 的平均误差为 4.1%,这里面有 Cox 和 Munk 模型引入的误差^[21],也有地面实验例如风速的测量(表 2 数据基于最近的海岸实测风速风向,实验条件有限,不是使用船只实地测量),当

时的气溶胶光学厚度 $\tau = 0.7$, 光学厚度较大, 也会引入误差. 为了检验 DPC 相机的气溶胶观测能力, 选择珠江三角洲这一气溶胶光学厚度通常较大的

地方开展实验, 在轨偏振定标精度受到影响, 专门的以偏振定标为目的的航空实验, 有助于提高定标的精度.

表2 $\lambda = 495 \text{ nm}$ 偏振度 P 的质量控制(太阳天顶角和方位角分别是 $47.9^\circ, 157.0^\circ$; 观测方位角的定义是从目标到传感器的矢量方向的方位角; DPC 观测的偏振度 P_M 是 3×3 区域的平均值, 选取了太阳耀光强度较大的 3 个区域)

观测天顶角/ $^\circ$	观测方位角/ $^\circ$	DPC 观测 P_M	6SV 模拟 P_S	相对误差/%
36.0	356.9	0.283	0.294	3.8
29.6	355.9	0.268	0.284	5.7
33.4	359.6	0.281	0.282	0.7
33.2	356.5	0.277	0.291	4.9
33.2	350.6	0.298	0.315	5.5
平均误差:				4.1

6. 结论与展望

根据偏振辐射原理, 推导了在轨偏振参数定标的辐射模型, 明确了偏振定标的参数; 根据相机参数的物理意义, 利用特殊的自然场景, 详细分析了在轨替代偏振定标的原理和方法. 通过 DPC 相机航空遥感实验的数据, 验证了方法的可行性, 并进行了误差分析.

通过对云定标的分析, 以后的航空遥感实验和定标数据选取, 必须满足定标所需的 3 个条件(详见第 5 节).

通过对太阳耀光数据的选取和分析, 可以得知: 太阳天顶角小于相机的视场角的一半的时候, 才能获取较明显的太阳耀光, 所以依据这一点, 必须限定航空实验的时间; 航空遥感实验进行的过程中, 需要对 DPC 设置合适的曝光时间, 通过目视实时遥感图像的亮度和对比度设定. 耀光通常只占整

幅图像中的一小部分, 如果把水体的亮度作为设置曝光时间的依据, 可能会造成某些耀光像元饱和.

光学镜头低频相对透过率 p 的最佳定标场景是大范围均一的沙漠场, 因为缺乏航飞实验数据, 没有深入研究. 不同偏振参数的替代定标需要不同的自然场景, 作为星载相机的航空预研任务, 偏振定标的方法需要大量的实验验证. 同时, 多种气象条件下的航空实验数据和辐射传输模型所需的所有能够实地测量的地面观测数据, 都是提高精度和评价误差的依据, 所以 DPC 相机还需要获取更多特殊气象条件下的多种自然场景的航空遥感实验数据, 训练更加稳定的定标方法和模型.

作者感谢中科院遥感所定标与真实性检验研究室高海亮博士生、李小英副研究员关于在轨辐射定标知识的指导, 谢东海博士生处理 DPC 航飞数据; 感谢国家环境保护卫星遥感重点实验室吕阳对 6SV 代码分析给予的帮助.

- [1] Chao N W, Liu W Q, Zhang Y J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 647 (in Chinese) [曹念文、刘文清、张玉钧 2000 物理学报 **49** 647]
- [2] Ruan C J, Pang W N, Gao J F, Shang R C 2002 *Chin. Phys.* **11** 126
- [3] Cheng T H, Gu X F, Chen L F, Yu T, Tian G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5323 (in Chinese) [程天海、顾行发、陈良富、余涛、田国良 2008 物理学报 **57** 5323]
- [4] Jian X H, Zhang C M, Zhu B L, Zhao B C, Du J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7565 (in Chinese) [简小华、张淳民、祝宝辉、赵葆常、杜鹃 2008 物理学报 **57** 7565]
- [5] Li Z Q, Blarel L, Podvin T, Goloub P, Chen L G 2010 *Appl. Opt.* **49** 1249
- [6] Cheng T H, Gu X F, Yu T, Chen L F, Tian G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7368 (in Chinese) [程天海、顾行发、余涛、陈良富、田国良 2009 物理学报 **58** 7368]
- [7] Gong P 2009 *Journal of Remote Sensing* **1** 1
- [8] Chen L G 2008 *Ph. D. dissertation* (Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [陈立刚 2008 博士学位论文(北京:中国科学院研究生院)]
- [9] Goloub P, Toubbe B, Herman M, Bailleul T, Hagolle O, Martinuzzi J M, Rouge B 1997 *Proceedings of SPIE* 2957

- Taormina, Italy Sep. 23, 1996 p299
- [10] Bret-Dibat T, André Y, Laherrère J M 1995 *Proceedings of SPIE* 2553 San Diego, USA, Jul. 1995 p218
- [11] Toubbé B, Bailleul T, Deuzé J L, Goloub P, Hagolle O, Herman M 1999 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **37** 513
- [12] Gu X F, Tian G L, Li X W, Guo J N 2005 *Science in China. E* **48** Supp. 1 1
- [13] Salomonson V V, Marlatt W E 1968 *J. Application Meteorology* **7** 475
- [14] Theocaris P S 1979 *Matrix Theory of Photoelasticity* (New York: Springer-Verlag) p18
- [15] Leroy M, Deuzé, Bréon F M, Hautecoeur O, Herman M, Buriez J C, Tanré D, Bouffiès S, Chazette P, Roujean J L 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 17023
- [16] Qiao Y L, Yang S Z, Luo R Z, Wang L Y, Xun Y L 2001 *High Technology Letters* **7** 36 (in Chinese) [乔延利、杨世植、罗睿智、王乐意、荀毓龙 2001 高技术通讯 **7** 36]
- [17] Goloub P, Deuzé, Herman M, Fouquart Y 1994 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **32** 78
- [18] Chen X F, Gu X F, Yin Q, Chen J P, Yu T, Zheng J J, Liu Y, Yin P F 2009 *Proceedings of SPIE* 7498 Yichang, China, Nov. 2009, p0D-1
- [19] Ottaviani M, Spurr R, Stammes K, Li W, Su W Y, Wiscombe W 2008 *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **109** 2364
- [20] Takashima T, Masuda K 1985 *Appl. Opt.* **24** 2423
- [21] Kawata Y, Yamazaki A 1998 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **36** 51
- [22] Cox C, Munk W 1954 *Journal of Marine Research* **13** 198
- [23] Cox C, Munk W 1954 *Journal of the Optical Society of America* **44** 838
- [24] Born M, Wolf E 1980 *Principles of Optics* - sixth edition (New York: Pergamon Press) p40
- [25] Vermote E F, Tanré D, Deuzé J L, Herman M, Morcrette J J 1997 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **35** 675
- [26] Li Z Q, Goloub P, Dubovik O, Blarel L, Zhang W X, Podvin T, Sinyuk A, Sorokin M, Chen H B, Holben B, Tanré D, Cnini M, Buis J P 2009 *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **110** 1954
- [27] Dubovik O, King M D 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 20673
- [28] Li Z Q, Goloub P, Devaux C, Gu X F, Deuzé J L, Qiao Y L, Zhao F S 2006 *Remote Sensing of Environment* **101** 519

In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC*

Gu Xing-Fa¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Chen Xing-Feng^{1)2)3)†} Cheng Tian-Hai¹⁾²⁾³⁾ Li Zheng-Qiang¹⁾²⁾⁴⁾ Yu Tao¹⁾²⁾³⁾
Xie Dong-Hai¹⁾²⁾³⁾ Xu Hua¹⁾²⁾⁴⁾

1) (State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

2) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Demonstration Center of Spaceborn Remote Sensing, National Space Administration, Beijing 100101, China)

4) (State Environmental Protection Key Laboratory of Satellites Remote Sensing Applications, Beijing 100101, China)

(Received 2 June 2010; revised manuscript received 30 September 2010)

Abstract

In order to make a good use of Chinese polarized satellite sensor, the directional polarized camera (DPC) has been developed and tested in the flight experiments. DPC camera is designed to observe the polarized and directional reflected radiation of the earth-atmosphere system. Retrieval of physical parameters from DPC data depends on the accuracy of calibration. The polarized camera radiative calibration includes two aspects: intensity and polarization. Based on the predecessors' work, we explore the polarization calibration principles and methods. Using the DPC aerial remote sensing experiment data, we have realized the polarization calibration and analyzed the results. This work may contribute to fundamental basis for the data processing and in-flight calibration of the future Chinese polarized satellite sensor.

Keywords: polarization calibration, remote sensing, in-flight calibration, DPC

PACC: 07.07. Df, 42.68. Wt, 43.28. We

* Project supported by the Chinese Defence Advance Research Program of Science and Technology (Grant Nos. KJSX0601 and 07K00100KJ) and the National High Technology Research and Development Program ("863" Program) of China (Grant No. 2008AA121501-2).

† Corresponding author. E-mail: chenxf@irsa.ac.cn