

## 视场重合程度对分时偏振测量精度的影响

王 羿,洪 津,骆冬根,胡亚东,汪方斌,李志伟

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 视场不完全重合是偏振测量的共性问题。视场不重合导致对目标探测时获取的偏振信息与真实的偏振信息存在差异,即产生伪偏振。造成分时偏振测量视场不重合的主要因素由两方面构成:仪器自身和仪器所搭载平台(飞机或卫星)的运动状态。首先介绍了偏振测量的基本原理,提出了视场重合程度影响偏振测量精度的原因;其次,结合国内外研究现状,提出了视场不重合的度量方法;再次,重点分析了星载背景下影响视场不重合的因素以及改进措施;最后以某星载偏振成像仪为例给出了分析结果并讨论。结果表明:采取补偿措施后由卫星平台造成的视场不重合程度远小于采取补偿前,仪器偏振测量精度得到了提高。

**关键词:** 分时偏振测量; 视场重合; 像移; 遥感

**中图分类号:** V474.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0606-05

## Influence of field of view alignment on division of time polarimetry accuracy

Wang Yi, Hong Jin, Luo Donggen, Hu Yadong, Wang Fangbin, Li Zhiwei

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Nearly all polarization measurement suffers from field of view (FOV) misalignment. FOV misalignment would result in discrepancy between the polarization measurement to the target and actual polarization information, named artificial polarization. Instrument and the platform (plane or satellite) movement are the main factors resulting in FOV misalignment of division of time polarization measurement. First of all, the principle of polarization measurement was discussed. The reason of FOV alignment influencing on polarimetry accuracy was described. Then the method on measurement on FOV alignment was proposed on reviewing and summarizing domestic and international current research. After that, factors on influence of FOV alignment space borne and the compensate effect were analyzed in detail. Finally, the discussion on a imaging Polarimeter was shown. Results indicate that FOV misalignment caused by satellite is decreased after compensation. Polarimetry accuracy was increased.

**Key words:** division of time polarization measurement; field of view alignment; image motion; remote sensing

收稿日期:2014-06-11; 修订日期:2014-07-12

基金项目:中国科学院科技创新重点项目(KGFZD-125-13-006)

作者简介:王羿(1985-),男,博士生,主要从事光电信息获取技术方面的研究。Email:wangyi@aiofm.ac.cn

导师简介:洪津(1969-),男,研究员,博士生导师,主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空航天遥感器工程技术方面的研究。  
Email:hongjin@aifm.ac.cn

## 0 引言

近年来,偏振探测在遥感应用中发挥了重要的作用<sup>[1]</sup>,在空间探测、云和大气气溶胶的探测<sup>[2-3]</sup>、环境监测、地质勘探、土壤分析<sup>[4]</sup>、海洋开发、农牧业发展<sup>[5]</sup>和军事应用等领域都取得了重大成果。

通常用斯托克斯法描述任意光波。由于4个斯托克斯矢量(分别用 $I$ 、 $Q$ 、 $U$ 、 $V$ 表示)均具有光强的量纲,而光电探测器将光强转换为电压值或电流值,因此,通过获得斯托克斯矢量从而研究目标偏振特性是目前大多数偏振测量仪器的基本原理。

偏振探测时,通常将入射光通过偏振分析器(例如线偏振片、棱镜等)形成线偏振光后进行光电转换。在 $xoy$ 平面内,在与 $X$ 轴的夹角为 $\alpha$ 的方向上进行探测所得的线偏振光强与斯托克斯矢量的关系为:

$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\alpha + U\sin 2\alpha) \quad (1)$$

式中: $I(\alpha)$ 为探测所得的光强; $I$ 、 $Q$ 、 $U$ 为斯托克斯矢量。在偏振遥感探测的背景下,表示圆偏振光的 $V$ 矢量为0。由公式(1)可知,至少测出三个不同角度的线偏振光强 $I(\alpha)$ ,联立可求出入射光斯托克斯参量中的 $I$ 、 $Q$ 、 $U$ ,并可求出被测目标的偏振信息,包括偏振度 $P$ 和偏振方位角 $\theta$ :

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

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \quad (3)$$

理想的偏振测量条件是使用同一探测系统在同一时刻完成对同一目标的探测。如前文所述,至少要在三个角度进行探测才能获得完整的入射光的偏振信息,因此理想的偏振测量条件难以同时满足。目前通常采用折中的方案进行偏振测量,在技术路线上分为分时测量和同时测量两种:分时测量用同一探测系统在准同时的时刻完成对同一目标进行探测;同时测量技术用不同探测系统在同一时刻对同一目标进行探测。技术上采用的折中方案使偏振测量精度增加了一个影响因素——视场不重合,即三次测量不完全是同一目标。无论是分时测量还是同时测量,均会因视场不重合而使三次偏振探测获取的偏振信息与目标真实的偏振信息存在差异,即产生伪偏振。

分时偏振测量采用运动部件或者调制的方式按

照时序依次获取不同偏振方向三幅偏振图像来解析被探测目标的偏振特性。该技术路线的典型代表是法国LILLE科技大学在90年代初所研发的POLDER (POLarization and Directionality of the Earth Reflectance) 仪器,其原理如图1所示。

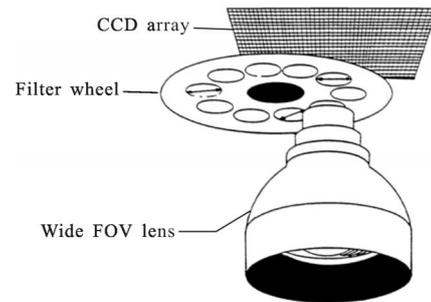


图1 POLDER 仪器原理

Fig.1 POLDER instrument concept

POLDER 仪器主要由 CCD 面阵探测器、装有偏振片和滤光片的转轮和宽视场镜头三部分组成。仪器工作时转轮旋转,探测器按照时序依次获取三个不同偏振方向的图像。偏振信息解析时,取三幅图像相同位置的数据进行处理,联立公式(1)并求出入射光斯托克斯参量中的 $I$ 、 $Q$ 、 $U$ 后可获取线偏振度和偏振方位角信息。

研究视场不重合的成因、度量方法、视场不重合对偏振测量精度的影响以及采取的改进措施具有积极的意义。其研究结论可以指导仪器设计,提高仪器偏振测量精度和仪器数据产品的质量。

## 1 视场重合程度的度量方法

度量视场重合的程度用像元移动(简称像移)的数量来描述,以像元为度量单位。以分时偏振测量为例,三次探测时,面阵探测器同一个像元探测区域重合,则像移为0个像元;否则像移不为0。视场不重合的程度通常不会是整个像元探测的区域,因此像移对数量可以取小数。像移的数量小于0则表示移动方向相反。

Christopher M. Persons<sup>[6]</sup>等人研究了像移的数量与线偏振度探测误差的关系,指出像移的数量与偏振探测误差成正比,像移数量越大,偏振探测误差越大。研究结论表明,在像移小于等于0.1个像元时,由像移产生的线偏振度测量误差小于0.5%。

## 2 产生视场不重合的因素分析

对于静态目标的测量,分时偏振测量技术视场不重合由仪器自身造成。如果仪器安装在移动平台(飞机或者卫星)上,随着平台的移动,分时测量时探测器同一像元必然不会探测地物同一区域,POLDER 仪器的做法是使用光楔(或棱镜)进行运动补偿,光楔自身会产生视场不重合,另外,带有光楔的曝光实际上使用的是成像光学系统的不同的孔径,这也会带来视场不重合。因此产生视场不重合的因素可以分为仪器自身产生的视场不重合和由平台产生的视场不重合两种。

仪器自身引起的视场不重合包括光学系统因素和非光学系统因素两种。光学系统造成的视场不重合包括光楔加工角度误差、偏振片塔差、光楔及偏振片安装角度误差、光楔安装方位误差和仪器安装角度定位误差等五种。前四种均为仪器自身造成,第五种误差指仪器安装在平台上的定位误差,对于地基偏振测量仪器该误差不存在。非光学系统造成的视场不重合包括转轮控制定位因素、探测器曝光时间的准确性和多次曝光的积分时间相对误差等。

仪器自身引起的视场不重合因素在工程设计加工和装配上均可检测,对于星载或机载偏振测量仪器而言,研究重点应放在分析平台产生的视场不重会上。总像移指标为 0.1 个像元,仪器自身引起的像移在设计时可以分析,因此可以推算并分配允许平台造成的像移数量,提出对平台相关参数的要求和约束,保证仪器在飞行过程中获得数据产品的质量。下文将以卫星平台为例定量分析由平台造成的像移数量。

### 2.1 分析方法

卫星高度的变化、卫星姿态变化以及偏流角的因素都会使仪器产生像移。先计算卫星平台参数不变的情况下探测器一个像元对应地面的区域(即星下点分辨率),得到分时测量之间的时间间隔,称为像元周期。卫星平台参数变化后,因像元周期保持不变而使三次成像时探测器一个像元对应地面不完全是同一个区域,可以通过比较两个区域重合的部分获得像移的数量。

### 2.2 星下点分辨率计算

设地心引力常数为  $GM$ ,卫星标称高度为  $H$ ,地

球的平均半径为  $R$ ,探测器像元大小为  $d$ ,光学系统焦距  $f$ ,则卫星速度  $v$  为:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+H}} \quad (1)$$

利用几何关系推算出星下点目标相对于卫星的速度  $V_{\text{nadir}}$  和星下点分辨率  $R_{\text{nadir}}$  为:

$$V_{\text{nadir}} = v \cdot \frac{R}{R+H} \quad (2)$$

$$R_{\text{nadir}} = H \cdot \frac{d}{f} \quad (3)$$

像元周期  $T_{\text{pixel}}$  为:

$$T_{\text{pixel}} = \frac{R_{\text{nadir}}}{V_{\text{nadir}}} \quad (4)$$

### 2.3 卫星高度变化产生的视场不重合因素分析

卫星高度变化造成速度变化,最终体现在星下点分辨率发生变化,造成分时测量时视场不重合,导致卫星速度变化的因素不仅是卫星自身高度的变化,还包括地球半径变化、地表高度变化。由于地表最高海拔约为 9 km,小于地球赤道和两极之间的半径之差,而地表最高处不在赤道或两极,因此地表起伏对卫星高度产生的影响可以包含在赤道两极地球半径之中。

设卫星高度变化速率为  $\Delta v$ ,分时探测时间间隔为  $t$ ,地球赤道与两极半径差为  $\Delta h$ ,则改变后的卫星轨道高度  $H'$  为:

$$H' = H + \Delta v t + \Delta h \quad (5)$$

像元周期变化为:

$$T_{\text{pixel}}' \frac{R_{\text{nadir}}'}{V_{\text{nadir}}'} = \frac{H' \frac{d}{f}}{\frac{R}{R+H'} \sqrt{\frac{GM}{R+H'}}} \quad (6)$$

因此卫星高度变化产生的像移的数量  $\delta_1$  为:

$$\delta_1 = \frac{T_{\text{pixel}}' - T_{\text{pixel}}}{T_{\text{pixel}}} \quad (7)$$

### 2.4 卫星姿态变化产生的视场不重合因素分析

卫星姿态变化造成仪器对地指向变化,使仪器进行三次分时偏振探测时没有指向同一地物,即产生视场不重合。设计卫星轨道参数时,通常只会提出姿态稳定度的参数,单位为  $(^\circ)/s$ ,因此在仪器设计初期只能根据该指标进行视场不重合因素分析。

设卫星姿态稳定度为  $\Phi$ ,则最坏情况下分时测量时,两次测量之间仪器对地指向变化角度为  $\Phi T_{\text{pixel}}$ 。如图 2 所示。

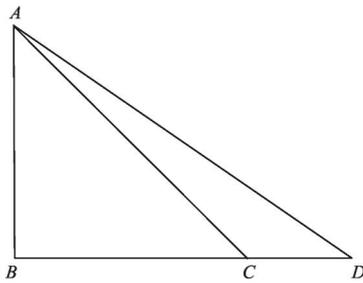


图2 卫星姿态变化示意图

Fig.2 Principle of satellite attitude changing

仪器处于A点,AB段为卫星高度H,BD段表示地面,∠BAC为视场,∠CAD=ΦT<sub>pixel</sub>,即指向变化的角度,CD段即载荷指向偏差造成的像移。

设仪器视场角为θ,则卫星姿态变化产生像移的数量δ<sub>2</sub>为:

$$\delta_2 = \frac{CD}{BC} = \frac{BD-BC}{BC} = \frac{\tan(\Phi T_{\text{pixel}}) - \tan\theta}{\tan\theta} \quad (8)$$

### 2.5 偏流角效应产生的视场不重合因素分析

遥感卫星轨道通常为太阳同步轨道,卫星从南往北飞行,地球自西向东运动,卫星在地面的轨迹实际上是两者运动的合成。如图3所示。

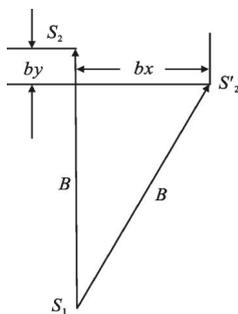


图3 偏流角产生原理

Fig.3 Principle of drift angel

不考虑地球自转的情况下,两次之间测量卫星从S<sub>1</sub>飞行至S<sub>2</sub>处,地球自转的因素使飞行轨迹发生偏移,卫星实际运行到S<sub>2</sub>'处,偏流角定义为∠S<sub>2</sub>S<sub>1</sub>S<sub>2</sub>'。依据卫星轨道知识,偏流角计算公式为:

$$\tan \angle S_2 S_1 S_2' = \frac{(R+H)\omega \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \psi}}{v \cos \theta} \quad (9)$$

式中:R为地球半径;H为卫星标称高度;ω为地球自转角速度;i为轨道倾角;ψ为当地纬度,北纬为正,南纬为负;v为卫星速度;θ为速度倾角。公式(9)中,轨道倾角i规定了卫星飞行轨迹,因此不会出现

根号内计算结果小于零的情况。

偏流角效应在沿轨和穿轨上均使仪器测量时发生视场不重合的情况。图3中bx和by分别表示穿轨方向和沿轨方向视场不重合的程度,卫星速度不变,则S<sub>1</sub>S<sub>2</sub>和S<sub>1</sub>S<sub>2</sub>'距离相同,设为B,可得:

$$bx = B \sin \angle S_2 S_1 S_2' \quad (10)$$

$$by = B(1 - \cos \angle S_2 S_1 S_2') \quad (11)$$

由偏流角效应造成的像移的数量取bx、by中较大的值,记作:

$$\delta_3 = \max\{bx, by\} \quad (12)$$

综上,在分时偏振测量仪器的星载应用中,总像移的数量δ为:

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} \quad (13)$$

另外,仪器自身造成的视场不重合的影响因素在星载背景下也会增加,偏振片和滤光片转轮转速不均匀、分时测量时探测器开始成像时刻的不一致、三次测量时探测器积分时间之间的误差都会造成视场不重合,在仪器设计阶段不能忽视。

### 3 视场不重合的改进措施

在星载背景下,随着平台的移动,分时测量时探测器同一像元必然不会探测地物同一区域。为保证用同一像元进行测量,通常的做法是使用光楔(或棱镜)进行运动补偿,即通过合理的光学设计,在卫星平台移动的情况下,使三次偏振测量时目标在探测器上所成的像重合。这种补偿措施要求偏振滤光片转轮的转速、三次测量时曝光的开始时间严格配合,否则视场不重合的程度更严重。对于这种补偿措施,除了通过设计减少视场不重合带来的误差外,还可以通过快速采集图像来减小目标的不一致性。POLDER仪器把图像的多个像素合并成一个,利用减小数据产品空间分辨率的方法减小视场不重合程度对偏振测量的影响。

对于卫星平台造成的视场不重合情况,采取的措施通常是减小偏流角效应的影响。对于卫星高度和卫星姿态的指标可以根据指标分配,计算出对卫星姿轨控分系统的设计依据,而偏流角效应则需要采取一定的措施进行减小。

在卫星没有修偏流角功能的情况下,可以通过仪器的设计补偿偏流角。造成的像移有两种补偿方

法:机械补偿法(旋转像面)和光学补偿法(旋转扫描镜的方式补偿)。根据仪器特点,机械补偿法是唯一可以采用的方法,该方法通过旋转探测器安装角度使探测器安装方向旋转,达到部分修正偏流角的效果。偏流角随纬度变化而变化,赤道附近偏流角最大,两极附近偏流角最小。因此机械补偿法不能保证在全球范围内消除偏流角的影响。

某原理类似 POLDER 的星载偏振成像仪,根据卫星轨道计算偏流角随纬度变化的曲线如图 4 所示。

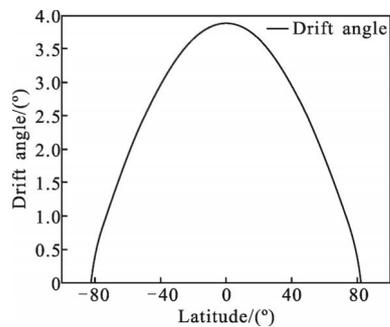


图 4 偏流角随纬度变化曲线

Fig.4 Relation between the drift angle and the latitude

偏振成像仪主要探测区域为  $5^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,该区域偏流角最大值为  $3.87^{\circ}$ ,最小值为  $1.88^{\circ}$ ,因此旋转探测器  $2.875^{\circ}$  可以将探测区域中偏流角效应影响减至最小。经计算,偏流角效应补偿前后像移数量如表 1 所示。

表 1 探测器旋转前后像移的变化

Tab.1 Image motion after rotation of CCD

Rotation of CCD	$b_x/\text{pixel}$	$b_y/\text{pixel}$
Before	0.067 5	0.002 3
After	0.017 5	0.000 2

由表 1 可知,旋转探测器方向可显著减小视场不重合程度。该卫星高度变化带来像元移动 0.000 8 像元,卫星姿态变化造成像移 0.004 4 像元,根据公式(13)计算出采取补充措施后,由卫星平台造成的像移为 0.018 1 像元,根据该指标,可计算分配给仪器自身造成的像移为 0.089 1 像元。

## 4 结 论

文中分析了视场不重合对偏振测量精度产生影响的原因,介绍了视场不重合的度量方法,重点分析了星载背景条件下,卫星平台参数对偏振量精度产生的影响程度以及采取的补偿措施。结果表明,采取补偿措施后由卫星平台造成的视场不重合程度远小于采取补偿前,补偿措施取得了很好的效果。下一步工作是设计实验并开展验证工作,评估补偿措施的有效性。

## 参考文献:

- [1] Talmage D A, Curran P J. Review article: remote sensing using partially polarized light [J]. *Remote Sensing*, 1986, 7 (1): 47-64.
- [2] Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Theory analysis of polarization characteristic of the light scattered by the aerosol [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (6): 862-865. (in Chinese)  
赵一鸣, 江月松, 路小梅. 气溶胶散射光偏振度特性的理论研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 862-865.
- [3] Chu Jinkui, Wang Wei, Cui Yan, et al. Measurement for influence of aerosols on polarized sky radiance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 520-526. (in Chinese)  
褚金奎, 王威, 崔岩, 等. 气溶胶对天空偏振辐射影响的测量[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 520-526.
- [4] Liu Dan, Zhao Yongqiang, Chen Chao, et al. Effects of spectral polarimetric BRDF by soil [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 293-298. (in Chinese)  
柳丹, 赵永强, 陈超, 程咏梅, 潘泉. 土壤偏振光谱二向反射影响研究[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 293-298.
- [5] Liu Xiao, Xue Mogen, Wang Feng, et al. Algorithm for camouflage target detection based on polarization imaging in woodland background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2290-2294. (in Chinese)  
刘晓, 薛模根, 王峰, 乔延利. 林地背景下伪装目标偏振成像检测算法 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2290-2294.
- [6] Persons C M, Chennault D B, Jones M W, et al. Automated registration of polarimetric imagery using Fourier transform techniques[C]//SPIE, 2002, 4819: 107-117.