

文章编号: 1672-8785(2010)03-0001-05

临近空间高分辨率偏振成像仪

顾明剑^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 偏振成像技术在大气探测、环境监测、资源普查和军事侦察应用中具有十分重要的作用, 该技术在航空遥感和空间遥感中已经开始使用。临近空间飞行器的发展为偏振成像遥感提供了新的应用舞台, 并显示出了明显的优势。本文介绍偏振原理、偏振探测和成像方式, 针对临近空间飞行器给出了一种凝视式高分辨率偏振成像系统的方案, 并通过论证和分析性能得出了该方案实现的可行性。

关键词: 偏振; 成像; 遥感; 凝视; 临近空间; 斯托克斯矢量

中图分类号: 73.7746 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.03.001

High Resolution Polarization Imaging Sensor for Use in Near-Space

GU Ming-jian^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Polarization imaging plays a very important role in the applications such as atmospheric detection, environmental monitoring, resource investigation and military reconnaissance. It has been used in aerial and space remote sensing. The development of near-space vehicles provides a new platform for polarization imaging remote sensing and shows its remarkable dominance. The polarization principle and polarization detection and imaging are presented. The design scheme of a staring high resolution polarization imaging system for near-space vehicles is given and its feasibility is verified after its performance is analyzed.

Key words: polarization; imaging; remote sensing; staring; near-space; Stocks vector

1 引言

偏振成像技术作为光学遥感领域的一种新颖探测技术, 越来越受到国内外研究人员的重视。这项技术在大气探测、行星探测领域中很早就被研究并已经成功应用, 近些年来在资源普查、军事目标识别领域也受到了国内外研究人员的关注。

临近空间是近几年来开始得到认识 and 发展的适合特殊飞行器运用的空间, 该空间位于 20km ~ 100km 高度, 这个高度具有特殊优越性, 在军事侦察^[1]、资源普查等方面给遥感技术提供了更广阔的舞台。临近空间飞行器与航空、空间平台相比具有明显的优势^[2], 与航空平台相比, 它提供的覆盖范围更大, 可以长时间驻留, 生存

收稿日期: 2009-11-26

作者简介: 顾明剑 (1976-), 男, 江苏武进人, 副研究员, 博士研究生。研究方向为空间遥感技术。 E-mail: gumingj@sina.com

能力强;相比空间轨道平台,则可以进行分辨率更高且针对特定地区的覆盖探测。

笔者认为,发展临近空间遥感技术特别是偏振探测技术,将会给偏振遥感应用带来显著的优势。本文描述在临近空间应用的一种凝视式高分辨率偏振成像系统,为偏振遥感领域提供一种有效手段。

2 偏振原理

光波是一种振动方向与传输方向垂直的横波。根据光波振动矢量方向确定性,这种横波可以分为线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光。线偏振光和圆偏振光是椭圆偏振光的椭率 e 的两个极限情况,它们都称作完全偏振光。自然光和绝大多数光源发出的光是非偏振光,可以看作是在与光传播方向垂直的平面内朝各个方向振动的线偏振光的叠加,但经过物质的反射、折射等作用后,这种非偏振光会变成偏振光。自然界中最常见的偏振光为部分偏振光,它可以被看作是自然光与完全偏振光的叠加^[3]。

由菲涅耳反射定律可知,无偏振特性的自然光在被介质表面反射时,其偏振状态会发生变化,从而形成部分偏振光。另外根据基尔霍夫理论,物体热辐射也会表现出偏振效应,见图 1。

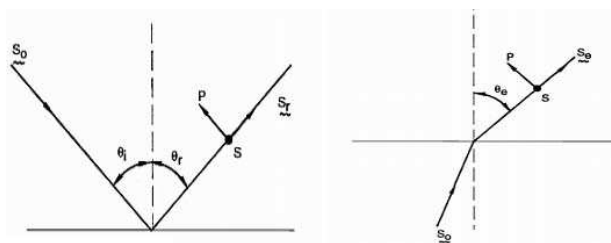


图 1 光的反射和辐射偏振特性图

介质发射和反射电磁辐射过程中产生的偏振特性由介质自身性质和光的入射条件决定。通过探测目标发射和反射的光的偏振特性,可以反过来对目标特性进行判断和识别。不同的物体或不同状态(例如表面粗糙度、含水量、构成材料的理化特征等)的同一物体都会产生不同的偏振状态,即使辐射相同的被测物体也可能

有不同的偏振特性。偏振光可用斯托克斯矢量 S 来描述,即 $S = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}^T$, T 表示对矩阵的转置,其中 S_0 描述光的强度, S_1 描述光在水平方向的振动矢量与垂直方向之间的差别, S_2 描述在 $+45^\circ$ 方向的振动矢量与在 -45° 方向之间的差别, S_3 描述圆偏振分量的大小。通过测量强度信息可得到 $S_0 \sim S_3$, 再经过对斯托克斯矢量进行变换,便可以导出介质的偏振物理特性。

3 偏振探测方式

3.1 完全偏振探测和部分偏振探测

完全偏振探测是通过测量 4 个偏振方向的辐射值 I_0 、 I_1 、 I_2 、 I_3 (其中 I_0 、 I_1 、 I_2 分别为偏振方向为 0° 、 45° 、 90° 的偏振辐射值, I_4 为经过 $1/4$ 波片和 45° 偏振方向的辐射值), 再通过推导得出斯托克斯矢量的。

$$\begin{cases} S_0 = I_0 + I_2 \\ S_1 = I_0 - I_2 \\ S_2 = 2I_1 - I_0 - I_2 \\ S_3 = 2I_3 - I_0 - I_2 \end{cases}$$

进一步还可得出偏振特性的偏振度 DoP 、线偏振度 $DoLP$ 、圆偏振度 $DoCP$ 、偏振角 θ 以及偏振圆椭率 e :

$$DoP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}$$

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$$

$$DoCP = \frac{|S_3|}{S_0}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{S_2}{S_1}$$

$$e = \frac{S_3}{S_0 + \sqrt{S_1^2 + S_2^2}}$$

自然光经自然界中的一般目标散射之后,其 S_3 圆偏振光分量非常小,会被噪声湮没。自然光只有被飞机、坦克等人造目标或者某些特殊的自然界目标作用后才会产生相对较大的 S_3 分量。

部分偏振探测主要围绕斯托克斯矢量中的前三个分量进行探测,以测量线偏振度 $DoLP$ 和

偏振角 θ 为目的。

3.2 偏振分析方式

系统偏振分析方式主要取决于偏振探测时间分辨率和矢量获取类型, 如旋转偏振片是用于线偏振探测的, 固定偏振片加旋转 $1/4$ 波片是用于全偏振探测的, 而矩阵探测器则是用于集成偏振分析的^[4]。

其中旋转偏振片方式在偏振探测中已得到广泛使用, 主要有旋转偏振片方式和通过旋转轮切换偏振方向的同光孔方式两种。

3.3 偏振成像方式

偏振成像根据平台、应用、性能和现有技术等因素, 主要有凝视偏振成像、推扫偏振成像和扫描偏振成像四种方式。

• 凝视偏振成像

通过面阵探测器和旋转偏振片方式分时进行不同偏振方向的成像, 通过对目标的二维凝视指向, 完成较大区域的偏振成像。目前国外正在研究偏振分析矩阵探测器^[4], 试图通过探测器和偏振片集成技术来提高仪器偏振探测的实时性和视场统一性。

• 推扫偏振成像

采用多相机光学镜头方式^[5]或多(偏振方向)线列探测器^[6], 通过跨轨推扫完成地面目标的偏振成像。

• 扫描偏振成像

采用单元或多元探测器, 在跨轨扫描过程中同时或分时完成不同偏振方向的探测, 进而形成二维偏振图像。但这种方式的探测效率低, 难以满足高分辨率偏振成像的要求。

4 临近空间偏振成像

通过装载在静止临近空间飞行器上的偏振成像仪进行对地遥感, 可实现用偏振探测方法执行环境和资源普查、海洋检测以及军事侦察任务。

4.1 系统原理

系统采取凝视偏振成像, 利用二维指向镜实现较大区域的凝视探测, 通道选取红、绿、蓝及可见近红外四个谱段, 每个谱段进行三个偏振方向探测。偏振分析和光谱分析采取滤光片轮定位方式, 实现各通道和各偏振方向的分时成像。系统原理参见图 2。

整个系统由光学系统(包括二维指向镜、滤光片偏振片轮)、CCD 探测器及驱动和模拟电路、电机和驱动电路、数字电路组成。

4.2 性能分析

4.2.1 瞬时视场

临近空间飞行器的飞行高度选为 20km, 星下点地面分辨率为 1m, 仪器的瞬时视场根据式(1)计算为 0.05mrad。

$$IFOV = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2} \text{地面分辨率}}{\text{飞行高度}} \right) \approx \frac{\text{地面分辨率}}{\text{飞行高度}} \quad (1)$$

4.2.2 有效孔径和系统焦距

光学有效孔径 D 选为 10cm, 根据探测的像元大小和瞬时视场, 用式(2)计算出系统的焦距为 26cm, f 数为 2.6。

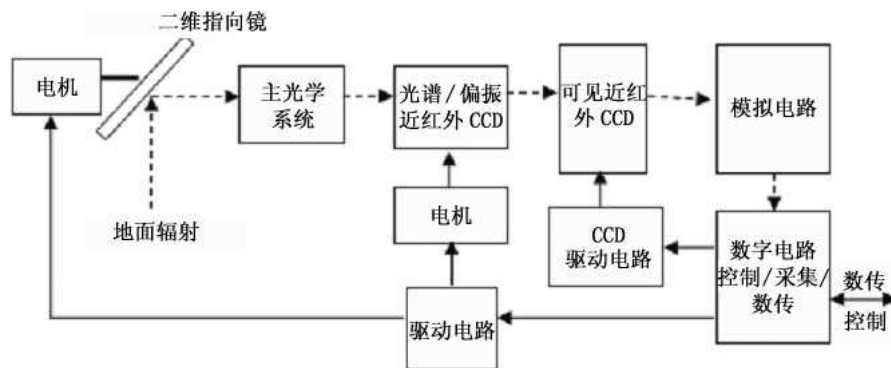


图 2 系统原理图

$$f = \frac{cellsize}{IFOV}, \quad FN = \frac{f}{D} \quad (2)$$

4.2.3 视场

临近空间飞行器运行在静止状态, 系统通过二维指向增加总视场的大小, 减小了大视场对探测器尺寸、规模和光学系统设计复杂性的要求。选用 1024×1024 元规格的探测器时, 一幅图像的视场约为 $2.93^\circ \times 2.93^\circ$ 。

为了探测目标反射的太阳光的偏振特性, 系统需要以较大的斜视角度进行成像, 并通过二维指向完成 $30^\circ \times 30^\circ$ 角度区域内 (入射角度为 $60^\circ \pm 15^\circ$, 太阳入射法向面方向左右 $\pm 15^\circ$) 的区域探测, 原理如图 3 所示, 这需要进行 10×10 次凝视定位和测量。

4.2.4 入射能量 [6,7]

当系统用于探测目标反射的太阳光谱辐射时, 目标被视为朗伯散射体, 且不同目标的反照率 ρ 不同。地球的平均反照率为 0.3 到 0.35。通道带宽内接收到的目标辐照度 E_0 为

$$E = \frac{\tau_a \cdot \rho \cdot \cos \alpha \cdot M(\lambda) \cdot \Delta \lambda}{\pi} \quad (3)$$

经过光学系统后, 探测器在瞬时视场立体角内接收的辐射功率为

$$P = E \cdot S_i \cdot T_{\text{int}} \cdot \tau_{\text{optic}} \cdot \tau_p \cdot \Omega \cdot \rho \cdot \cos \beta \quad (4)$$

式中, S_i 为入瞳面积 (由光学有效孔径 D 决定), Ω 为瞬时视场立体角 (由瞬时视场角 IFOV 决定), ρ 为太阳反照率, τ_{optic} 为光学系统的透过率, τ_p 为偏振片的透过率, τ_a 为大气透过率, T_{int} 为积分时间, α 为太阳辐射方向与目标法向的夹角, β 为系统观测角度与目标法向的夹角, $M(\lambda)$ 为太阳光谱辐射在目标上的辐射照度, λ 为光谱的中心波长, $\Delta \lambda$ 为光谱带宽。

由式 (3) 和式 (4) 可以得出探测器接收的辐射功率为

$$P = \frac{D^2}{4} T_{\text{int}} \tau_{\text{optic}} \tau_p \tau_a IFOV^2 \rho \times \cos \alpha \cos \beta M(\lambda) \Delta \lambda \quad (5)$$

表 1 给出了 $0.865 \mu\text{m}$ 通道的相关取值。通过计算, 得到该光谱通道的入射能量为 0.263 pJ 。

4.2.5 信噪比分析

系统的噪声主要包括光子噪声、探测器读

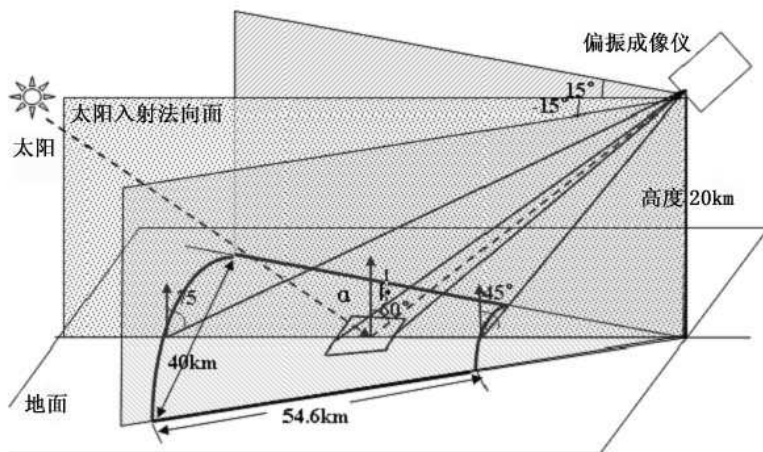


图 3 较大区域成像的示意图

表 1 系统的主要技术参数

参数 (单位)	D (cm)	T_{int} (ms)	τ_{optic}	τ_p	τ_a	IFOV (mrad)	α (deg)	β (deg)	$M(\lambda)$ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)	ρ	λ (μm)	$\Delta \lambda$ (nm)
取值	10	200	0.2	0.5	0.8	0.05	60	60	0.075	0.35	0.865	40

出噪声、暗电流噪声、后续电路噪声以及量化噪声。尽管 CCD 面阵器件的帧转移噪声、KTC 噪声也会对系统的信噪比带来一定影响,但由于目前 CCD 器件的电荷转移效率可达到 99.9999%,通过采用相关双采样技术后, KTC 噪声可降到很低,所以这两部分噪声在分析中暂不予考虑。

对于使用 CCD 探测器的系统,使用光子数来计算能量和噪声是十分方便的。本文采用光子数和电子数的形式描述信噪比的计算过程。系统的信噪比可以描述为

$$SNR = \frac{electrons}{\sqrt{electrons + NR^2 + NDC^2 + NC^2}} \quad (6)$$

$$photons = \frac{Energy}{h \cdot c} \lambda \quad (7)$$

$$electrons = photons \cdot \eta \quad (8)$$

式中, h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, NR 为探测器的读出噪声, NDC 为暗电流噪声, NC 为后续电路噪声。入射能量通过式 (7) 可以换算为光子数 $photons$, 通过探测器光谱量子效率 η 得到能量转换成电子的数量 $electrons$ 。

表 2 信噪比计算的主要参数

参数 (单位)	能量 (pJ)	λ (μm)	η (mrad)	NR (e-)	NDC (e-)	NC (e-)
取值	0.263	0.865	0.5	6	10	50

根据表 2 给出的相关参数,可以得出系统的信噪比约为 754,说明系统能够获得较好的信噪比。

这里需要说明的是,系统设计中选用的探测器是 E2V 公司生产的 CCD42-20 型探测器,其电荷存储深度为 120Ke-,不能满足入射能量为 1143Ke- 的要求。系统是通过 10 次积分采样(每次 20ms)实现最终的能量收集的,这样便满足了其性能要求。

4.3 需要解决的技术

4.3.1 高精度二维指向控制

系统运行在静止的临近空间飞行器上,它是通过小视场凝视方式来实现较大区域的高分辨

率偏振成像探测的。由于瞬时视场为 0.05mrad,二维指向精度不能大于 2 角秒,因此需要研究用高精度的二维指向闭环控制技术来实现定位。

4.3.2 系统偏振标定 [6]

尽管系统的光学设计极大地减少了系统自身的偏振,但为了提高系统的偏振检测精度和准确度,仍需对系统进行偏振标定,得到测量光学系统的 Muller 矩阵,为反演目标偏振特性提供转换函数,最终获取目标偏振特性的斯托克斯矢量。为了得到准确的系统偏振标定结果,需要建立精确的偏振源和相应的标定方案,这些不是本文讨论的重点。

5 结语

本文结合偏振原理,讨论了偏振探测和成像的方式,并针对临近空间应用提出了一种高分辨率凝视偏振成像系统的方案,通过对技术参数的论证,说明了该方案的可行性,并指出了实现这一方案需要解决的一些技术问题。

临近空间偏振成像技术能够提供分辨率高、性能好的偏振测量数据,可克服偏振成像在航空、空间应用中的不足,将会成为国土资源调查、军事侦察、海洋监测等方面的重要遥感手段。

参考文献

- [1] 李怡勇, 李智, 沈怀荣, 等. 临近空间飞行器发展与应用分析 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(2): 63-65.
- [2] 王胜开, 全寿文, 李淑华, 等. 临近空间和临近空间飞行器 [J]. 现代军事, 2008, 7: 37-38.
- [3] 新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤. 偏振光 [M]. 北京: 原子能出版社, 1994.
- [4] John Parsons, Robert Craig. A LWIR Polarimetric Imager [C]. Edinburgh: 4th EMRS DTC Technical Conference, 2007: B11.
- [5] 邵卫东. 机载偏振遥感仪技术研究 [D]. 上海: 中科院上海技术物理研究所博士论文, 2002.
- [6] 王峰, 洪津, 杨伟峰, 等. 复合线阵推扫偏振成像技术研究及方案设计 [J]. 半导体光电, 2006, 27(4).
- [7] 周世椿. 高级红外光电技术导论 [M]. 上海: 上海技术物理研究所, 2009.