

# 多角度偏振辐射计系统设计与实现

崔文煜<sup>1,2</sup> 张运杰<sup>1,2</sup> 易维宁<sup>1,2</sup> 洪 津<sup>1,2</sup> 乔延利<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031  
<sup>2</sup> 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)

**摘要** 多角度和偏振遥感可解决传统遥感所不能解决的大气探测和目标识别等方面的问题。为实现气溶胶偏振信息的多角度探测,提出了一种新型的多角度偏振辐射计。该辐射计可以在多个角度上测量大气的偏振光谱信息,为大气光学和微物理特性的高精度反演提供重要的实测数据源。作为航天载荷的原理样机,多角度偏振辐射计的光机系统由多路并行望远光学模块组成,可在 $110^\circ$ 视场范围内,以 $0.5^\circ$ 间隔实现偏振信息的多角度探测;采集控制与数据传输系统由双控制核心和高速接口组成,大大提高了系统的并行处理能力和数据传输速度,可在高速运动的平台上实现多路偏振光谱信息的同步采集与实时传输,避免了由平台移动和信号的异步采集引入的误差。航飞试验结果表明,多角度偏振辐射计可实现气溶胶偏振信息的高精度探测。

**关键词** 遥感;偏振遥感;多角度探测;同步采集

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0828003

## System Design and Implementation of Multi-Angle Polarimeter

Cui Wenyu<sup>1,2</sup> Zhang Yunjie<sup>1,2</sup> Yi Weining<sup>1,2</sup> Hong Jin<sup>1,2</sup> Qiao Yanli<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** Multi-angle and polarized remote sensing can solve the problems such as atmospheric sounding and target recognition which cannot be solved by traditional methods. To implement the multi-angle detection of aerosol polarizing information, a new type of multi-angle polarimeter is proposed. This polarimeter can obtain polarizing spectral signals of the atmosphere on different angles, which provides a measured data source for the precise retrieval of the optical and microphysical characteristics of the atmosphere. As the principle prototype of a spaceborne instrument, the opto-mechanical system of the multi-angle polarimeter is composed of multi-channel parallel telescopic optical modules to realize the multi-angle detection of polarizing information within a view-field range of  $110^\circ$  and a sampling interval of  $0.5^\circ$ . With the design of dual controlling units and high-speed communication interfaces of the sampling control and data transporting system, the synchro-sampling and real-time transportation of the polarizing signals on multi-spectral channels has been fulfilled even on a high-speed platform, which eliminates the measurement errors brought in by platform movement and asynchronous acquisition of multi-channel signals. The on-flight experimental results show that this instrument can realize the high-precision measurement of aerosol polarizing information.

**Key words** remote sensing; polarized remote sensing; multi-angle detection; synchronous acquisition

**OCIS codes** 280.1100; 280.4788; 010.0280

## 1 引 言

多角度对地观测能获得更为详细可靠的地面目标三维空间结构参数,以满足对定量遥感反演参数

个数的要求<sup>[1]</sup>。探测目标地物偏振信息,能够很好地分辨目标上低反射区域和目标轮廓,从复杂的背景中提取目标的三维信息,解决传统遥感所不能解

收稿日期: 2012-01-12; 收到修改稿日期: 2012-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(40671135, 40971196)资助课题。

作者简介: 崔文煜(1985—),男,博士研究生,主要从事光学遥感方面的研究。E-mail: wenyu19@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 乔延利(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事偏振遥感技术方面的研究。E-mail: yljiao@aiofm.ac.cn

决的大气探测和伪装识别等方面的问题<sup>[2]</sup>。近些年来,越来越多的学者利用偏振遥感手段对大气特性进行了研究<sup>[3~5]</sup>,一些含偏振通道的多角度对地探测仪器陆续发射上天,提供了更高质量的大气气溶胶和地表观测数据。其中以法国空间局 CNES 的 POLDER<sup>[6]</sup>最引人注目。然而,POLDER 作为面阵成像型偏振遥感系统,在高速运动的平台上进行测量,会存在由信号分时获取带来的相应误差甚至虚假偏振信息。

多角度偏振辐射计类似于美国的 APS<sup>[7]</sup>是一种扫描型的偏振探测器。它可以同时获取目标的 9 个波段(443~2250 nm)、4 个偏振态的光谱偏振信息。相比于面阵型成像系统,它消除了多路信息分时获取带来的观测误差;更容易实现在轨偏振定标和多角度探测<sup>[8]</sup>;由于采用了单元探测器,使得波段设置范围更宽,能够进一步提高大气特性参数的反演精度。为了实现多路光谱偏振信息的同步获取,保证高测量精度,基于辐射计光机结构的特点,对采集控制与数据传输系统进行了相应的设计并进行了航飞试验。结果表明,该系统可以配合光机系统完成多路信号的同步采集与实时传输,并获得准确有效的数据。

## 2 多角度偏振探测原理

卫星测量的大气顶辐射主要包括大气散射和地表反射。在可见光波段,大气散射光具有很强的偏振特性,而地表是低偏振的<sup>[9]</sup>,卫星观测到的偏振辐射对气溶胶粒子的大小及折射指数比较敏感,对地表变化不敏感。根据这个原理并结合偏振辐射计的特点,可以综合利用标量辐射和偏振反射信息实现陆地上空大气气溶胶和地表反照率的反演<sup>[10]</sup>。

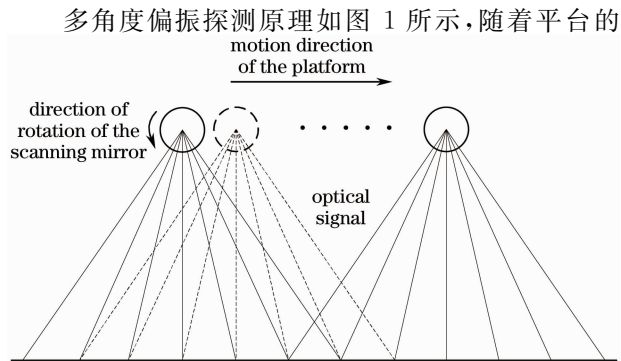


图 1 系统多角度信息获取原理图

Fig. 1 Principle of multi-angle information acquisition of the system

飞行,探测仪器可在扫描角度范围内等间隔进行同步信息测量,从而实现沿轨方向对同一目标的多角度偏振光谱信息探测。

探测仪器在多个观测角上测量了大气及地表在偏振方向  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  上的反射光强  $I_{0^\circ}$ 、 $I_{90^\circ}$ 、 $I_{+45^\circ}$ 、 $I_{-45^\circ}$ ,由此算出斯托克斯矢量参数  $I$ 、 $Q$ 、 $U$ ,单位为  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ,  $I$  为光波的总强度,  $Q$  和  $U$  分别为

$$Q = I_{0^\circ} - I_{90^\circ}, \quad U = I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ}. \quad (1)$$

多角度总反射率  $R_I$  和多角度偏振反射率  $R_P$  为

$$R_I = \frac{\pi I}{\mu_0 F_0}, \quad R_P = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_0 F_0}, \quad (2)$$

式中  $\mu_0$  为太阳天顶角余弦,  $F_0$  为太阳常数 [ $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ]. 将这些  $R_I$ 、 $R_P$  与基于地气系统的矢量辐射传输方程模拟计算值构成的查找表进行对比,来进行气溶胶光学特性的反演。

## 3 多角度偏振辐射计的构成

### 3.1 光机系统

为了实现在多波段通道上对多路偏振光谱信息进行同步采集,仪器的光机系统为集束同轴的探测光路。系统由正交扫描镜模块和由 6 个望远镜系统组成的多路并行望远光学模块构成,其结构如图 2 所示。

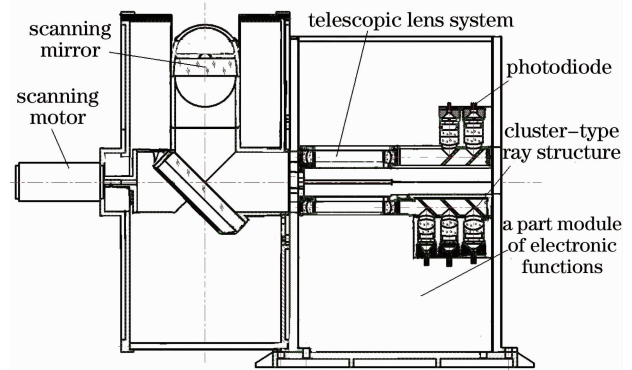


图 2 光机系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the opto-mechanical system

偏振辐射计的正交扫描镜通过旋转对大气目标、仪器定标和本底进行扫描,将光束反射至多路并行望远光学模块。望远光学模块通过沃拉斯顿棱镜和分色片再把光束分成 9 个波段 4 个偏振方向 ( $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ ) 共 36 路偏振光,最终会聚在多个探测器的光敏面,转换成电信号并行输出。光机系统的性能参数如表 1 所示,IFOV 为瞬时视场。

表 1 光机系统的性能参数

Table 1 Properties of opto-mechanical system

Parameter	Value
Spectral bands /nm	443, 490, 555, 665, 865, 940, 1380, 1610, 2250
Field of view /( $^{\circ}$ )	110
I FOV /mrad	17.4
Telescope focal length /mm	52
Combined focal length /mm	29

仪器的扫描镜旋转  $360^{\circ}$  为一个采样周期,其中对地扫描范围是  $-55^{\circ}\sim+55^{\circ}$ ,每隔  $0.5^{\circ}$  采样 1 次,此外还有 1 次定标测量和 5 次暗电流测量,其采样周期工作示意图如图 3 所示。根据平台高度和飞行速度以及分辨率等指标要求,采集周期为 440 ms,每个采样点间的间隔时间约为  $600\ \mu\text{s}$ 。

### 3.2 采集控制与数据传输系统

根据仪器的工作原理及功能需求,设计仪器电子学系统原理框图,如图 4 所示,其关键环节在于采集控制与数据传输系统的解决方案。大体的工作流

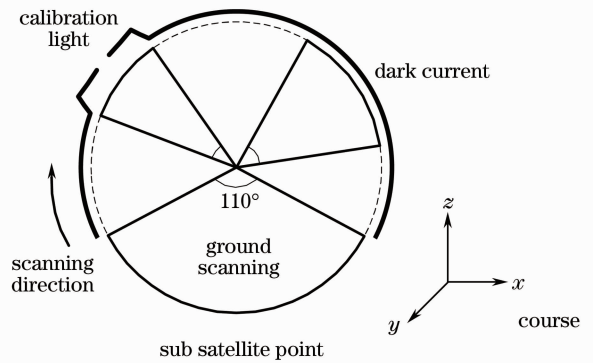


图 3 采样周期工作示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sampling period

程是:光信号经探测器转化为电信号,并被放大至可探测的电压信号,经过模数转换(A-D)模块转换成数字信号,被现场可编程门阵列(FPGA)读取。FPGA 将这些数据进行上传至工控计算机并同时存入随机存储器(RAM)进行备份。微控制单元(MCU)通过控制所有外设与 FPGA 协调完成采样过程。

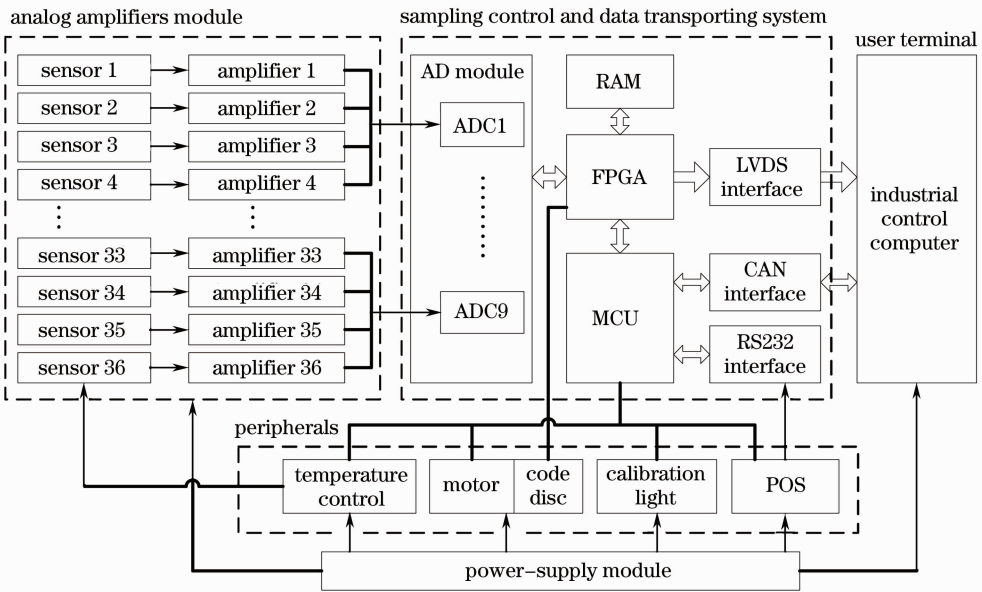


图 4 仪器电子学系统框图

Fig. 4 Block diagram of electronics system

#### 3.2.1 采集控制系统

为实现多路信号的同步获取,采集控制系统的并行处理能力至关重要。由图 3 可知,采样进程在一个采样周期中占用大部分时间,信号采集将占用大量系统和总线资源,而采样工作又需要多个外设(扫描镜电机、码盘、定标灯、POS 机和温控等)同时配合工作才能完成,因此,单个控制单元的并行处理能力明显不足,很可能使系统处于一种不可控的状

态而极易陷入某个死循环中。

鉴于星载传感器的不可维修特性,该仪器的采集控制系统采用了更可靠的 MCU+FPGA 双控制核心电路,它具有强大的并行处理能力,非常适合多路信号的处理和对多个外设的控制。FPGA 具有高处理速度、丰富的 I/O 资源以及多进程并行工作等卓越性能,可以独立完成信号模数转换、数据存储与传输工作。

FPGA 控制 9 个 4 通道模数转换芯片,同时完成 9 个波段 4 个偏振方向共 36 路信号的模数转换,转换时间为  $2.5 \mu\text{s}$ 。FPGA 的处理速度在纳秒级,可以忽略,因此在  $600 \mu\text{s}$  的采样间隔里完全可以完成一个采样点上的数据采集。同时,MCU 通过控制外部设备配合 FPGA 完成仪器的信号采集任务,并在此过程中,实时监听工控计算机的指令,监测仪器状态并上传,自动处理系统错误和极端状态,保证了仪器的正常运转。

以 MCU 为主 FPGA 为辅的双控制核心设计,不仅使 MCU 拥有更多的裕余资源,同时避免向 FPGA 嵌入控制单元引入过多的组合逻辑,减少了出错的可能性,提高了系统的稳定性和可靠性。

### 3.2.2 数据传输系统

通信接口设计是实现多路信号同步采集的必要条件。根据上述信号采集工作的特点,电子系统应采用时采时传的数据传输方式,即每个采样点上的偏振光谱信号,一经转换就即刻上传,因此需要一个高速稳定的传输接口。同时,由于系统与用户终端(工控计算机)间的通信接口会长期被大量数据流占用,易造成工作指令和系统状态反馈信息延时和受阻,对整个仪器造成不可预知的严重后果。因此,系统使用了两个接口分别进行指令交互和数据传输,并且用并行数据传输方式实现高速传输。

控制器局域网(CAN)总线的实时性以及强抗干扰能力等优点已经为航天领域所认可。SSTL 已经在 6 颗 LEO 卫星中应用了 CAN 总线网络,用于实现星载计算机与其他任务节点之间的通信<sup>[11]</sup>。本系统采用从硬件系统到工控计算机的点对点通讯方式,使用 CAN2.0A 通讯协议,设置波特率为 500 kps,用来完成仪器电子学系统同用户终端间的信息交互:指令接收和仪器状态信息上传。

低压差分信号(LVDS)利用非常低的电压摆幅(约 350 mV)在两条印刷电路板(PCB)走线或一对平衡电缆上通过差分电压传输数据<sup>[12]</sup>。它能在较短的距离内高速驱动几百兆甚至几千兆的数据,最新的 LVDS 接口模块能够实现 3 Gb/s 以上的数据速率。而且还能保持低功耗和出色的抗噪声性能。因此, LVDS 技术已经应用于航天领域,例如, SpaceWire 就是一种基于 LVDS,面向航天应用的传输总线技术<sup>[13]</sup>。

仪器在每个采样点同时采集 443、490、555、665、865、940、1380、1610、2250 nm 共 9 个波段、每波段 4 个偏振方向的光信息,共 36 路数据,量化精

度为 13 位。以 16 位并行方式传输,即使在很低的系统主频下(10 MHz),向工控计算机传完一个采样点数据也只需耗时约  $4 \mu\text{s}$ ,加上数据采集耗时  $2.5 \mu\text{s}$ ,在采样间隔  $600 \mu\text{s}$  内完成数据采集和传输仅需约  $7 \mu\text{s}$ ,完全满足要求。

使用 CAN+LVDS 的接口方式进行工控计算机与硬件电路间的通信,既能够满足多路信号数据的高速率传输,又能保证上位机指令和系统状态信息的传输不受阻碍和拖延。而且 CAN 总线与 LVDS 都是差分信号传输,具有出色的抗噪性能,保证了数据质量。

## 4 航飞试验结果分析

2011 年 7 月 14 日,多角度偏振辐射计在天津进行了航飞实验。从上午 11:45 至下午 16:30,仪器连续正常工作了 5 h 15 min,状态稳定,并获得了大量的观测数据。试验条件与飞行状态如表 2 所示。

表 2 试验条件

Table 2 Experimental conditions

Item	Information
Date and time	2011-07-14, 11:30~16:45
Location	Tianjin
Weather	Clearness
Longitude and latitude	E 117°11'; N 39°09'
Platform	Yun-12
Flight altitude	575~3300 m
Landform	Dry land, coast, sea surface

图 5 为同步相机于当日 13:26:32 高度 650 m 处拍摄的飞机正下方的海面图像。

从照片可以看到,海面有略微的耀斑。图 6 是同一时刻对海面测得的 4 个偏振方向的辐射强度数值。图中横坐标为扫描角度( $^{\circ}$ ),纵坐标为探测器的



图 5 同步相机拍摄的海面图像

Fig. 5 Photo of sea surface taken by the synchronous camera



原始测量数值。在图 6 上可以看到在扫描角度  $26^\circ$  附近出现峰值。而由计算可得图像拍摄时刻当地的太阳高度角为  $64^\circ$ ，即太阳光对海面的入射角是  $26^\circ$ ，因此仪器约在扫描角度  $26^\circ$  观测到反射光，符合信号在此处陡增至最大值的趋势。

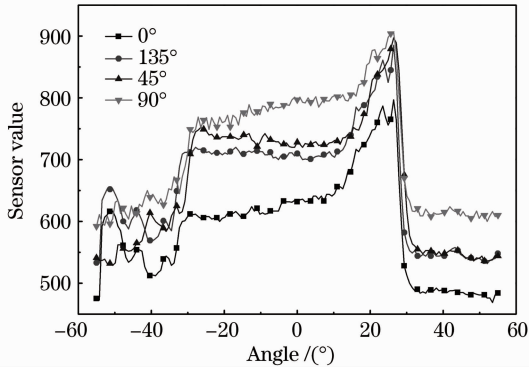


图 6 4 个偏振方向上的辐射量

Fig. 6 Irradiation on 4 polarization direction

根据水体反射光偏振特性，自然光以非布儒斯特角入射光滑水面，反射和折射光均变成部分偏振光，其反射光偏振度为<sup>[14]</sup>

$$P = \frac{2 \sin \alpha \tan \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{n^2 - \sin^2 \alpha + \sin^2 \alpha \tan^2 \alpha}, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为自然光入射角度， $n$  为水体的折射率。通常海水折射率大约是 1.34，而太阳光入射角如上述分析可知是  $26^\circ$ ，通过上式计算可得当时海面反射光偏振度的理论值约为 32.83%。图 7 是对图 6 中  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  三个偏振态下的测量数据进行偏振度计算得到的结果，图 7 中偏振度 (DOP) 的最大值出现在  $26.4^\circ$  附近，约为 32.97%。这说明了仪器测得的数据准确有效，跟实际情况相吻合。

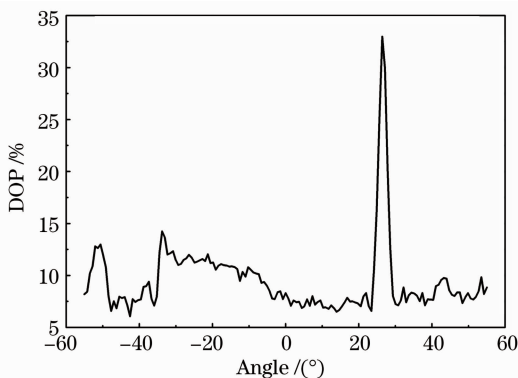


图 7 偏振辐射计观测到海面光信号的偏振度曲线  
Fig. 7 curve of DOP of optical signal at sea surface detected by polarimeter

## 5 结 论

提出了一种多角度偏振辐射计，通过集束同轴的光机结构设计，双控制核心与高速接口的电路设计，保证了多路光信息的同步获取，提高了大气气溶胶和地表观测数据质量。对设计的多角度辐射偏振辐射计进行了航飞实验结果表明，多角度偏振辐射计能够准确获取多角度光谱偏振信息，为大气光学特性的高精度反演提供可靠的数据源。

## 参 考 文 献

- 1 B. G. Henderson, J. Theiler, P. Villeneuve *et al.*. The polarized emissivity of a wind-roughened sea surface: a Monte Carlo model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **88**(4): 453~467
- 2 Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui *et al.*. The present research and developing trend of polarization remote sensing [J]. *Laser and Infrared*, 2007, **37**(12): 1237~1240  
张朝阳, 程海峰, 陈朝辉等. 偏振遥感的研究现状及发展趋势 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(12): 1237~1240
- 3 Wu Lianghai, Gao Jun, Fan Zhiguo *et al.*. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0701005  
吴良海, 高 隽, 范之国等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0701005
- 4 Sun Xuejin, Li Hao, Tang Liping. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0501001  
孙学金, 李 浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气体散射偏振度特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0501001
- 5 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0101002  
郝增周, 龚 芳, 潘德炉等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0101002
- 6 Y. Andre, J. M. Laherrere, T. Bret-Dibat *et al.*. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument [C]. *SPIE*, 1995, **2572**: 7090~7101
- 7 J. P. Richard, C. Nardell, B. Carins *et al.*. Aerosol polarimetry sensor for the glory mission[C]. *SPIE*, 2007, **6786**: 67865L
- 8 Sun Xiaobing, Hong Jin, Qiao Yanli *et al.*. Project of multi-angle polarimetric system onboard satellite for remote sensing of atmosphere [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(3): 198~201  
孙晓兵, 洪 津, 乔延利等. 卫星大气多角度偏振遥感系统方案研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2006, **1**(3): 198~201
- 9 Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing *et al.*. Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 900~1003  
叶 松, 方勇华, 孙晓兵等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 900~1003
- 10 Sun Xia, Zhao Huijie. Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol over land surface from POLDER data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1772~1777  
孙 夏, 赵慧洁. 基于 POLDER 数据反演陆地上空气溶胶光学特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1772~1777
- 11 Zhou Xinfa, Shang Zhi, Liu Qun. The application of the industrial CAN bus in the space field [J]. *Programmable Controller & Factory Automation*, 2006, (1): 60~63  
周新发, 尚 智, 刘 群. 工业现场 CAN 总线技术在航天领域的应用[J]. *现场总线与网络技术*, 2006, (1): 60~63

- 12 Xu Hong. Principle and application of low voltage differential signal [J]. *Communication & Audio and Video*, 2002, (2): 34~37  
徐 洪. LVDS 的工作原理与应用[J]. 通信与广播电视, 2002, (2): 34~37
- 13 Kang Yongqi. The design and implementation of SpaceWire mode IP core oriented spale application [J]. *Microelectronics and Computer*, 2005, **22**(9): 120~122  
康咏岐. 面向航天应用的 SpaceWire 节点单元的 IP 核设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2005, **22**(9): 120~122
- 14 Wu Taixia, Yan Lei, Xiang Yun *et al.*. The multi-angle polarization spectral character of water and its applications in water color remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(2): 448~452  
吴太夏, 晏 磊, 相 云. 水体的多角度偏振波谱特性及其在水色遥感中应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(2): 448~452

栏目编辑: 何卓铭