

基于图像跟踪变视场光度计的研制

杨东^{1,2**}, 李建玉³, 徐文清^{3*}, 徐青山^{1***}, 魏合理^{3,4}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所基础科学中心光电探测室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031;

³中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

⁴中国科学技术大学环境科学与光电技术研究院, 安徽 合肥 230026

摘要 数值模拟显示在太阳光前向散射角 5° 范围内, 视场变化探测的信号对卷云的光学厚度和有效尺度敏感。研发了一种基于图像跟踪的自动快速变视场太阳光度计(VFOVSP), 可快速测量不同视场太阳的直接辐射, 为地基测量卷云提供了一种新的技术手段。该仪器采用图像跟踪技术, 解决了薄云条件下四象限跟踪失效的问题。采用程控可变视场光阑, 该仪器实现了短时间内不同视场的快速测量。将该仪器测量的气溶胶光学厚度(AOT)与太阳光度计(POMO2型)的测量结果进行了对比, 结果显示该仪器测量的 AOT 方均根误差小于 0.5%, 这表明该仪器测量气溶胶的精度高。结合不同的天气条件, 分析了该仪器不同视场比值的变化, 比值的变化与粒子尺度和光学厚度有关, 为反演卷云的光学特性提供了可能。

关键词 测量; 太阳光度计; 可变视场光阑; 卷云探测; 图像跟踪

中图分类号 TH765

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091201

Development of Variable Field Photometer Based on Image Tracking

Yang Dong^{1,2**}, Li Jianyu³, Xu Wenqing^{3*}, Xu Qingshan^{1***}, Wei Heli^{3,4}

¹Laboratory of Photoelectric Detection, Centre for Basic Science, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China;

³Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

⁴School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The numerical simulation shows that the signal of field change detection is sensitive to the optical thickness and effective scale of the cloud in the range of 5° of the forward scattering angle of the sun. We develop a solar photometer (VFOVSP) based on image tracking and automatic fast changing field of view. It can quickly measure the direct radiation of different fields of view and provide a new technical mean for ground measurement of cirrus. The instrument makes use of image tracking technology to solve the problem of four quadrant tracking failure under the condition of thin cloud. A programmable variable field aperture is used to measure the different fields of view in a short time. The aerosol optical thickness (AOT) measured by VFOVSP is compared with that by a solar photometer (POMO2). The root mean square error of the AOT measured by VFOVSP is less than 0.5%, which indicates that the instrument has a high accuracy in the aerosol measurement. The change of the field ratio is analyzed under the different weather conditions. The change of the ratio is related to the particle size and the optical thickness, which provides possibility for retrieving optical properties of cirrus clouds.

Key words measurement; sun-photometer; variable field of sight; cirrus detection; image tracking

OCIS codes 120.4640; 230.3120; 120.4640; 010.1615; 110.2970

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-03-27; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ201608)、中国科学院 GF 实验室创新基金(CXJJ-16S081)

* E-mail: wqxu@aiofm.ac.cn; ** E-mail: 1291520815@qq.com; *** E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn

1 引言

卷云也称为冰云,主要由非球形冰晶粒子组成,在地球辐射收支及水循环中具有重要作用,其辐射特性一直是国际研究的热点问题^[1-2]。在实际大气中,粒子不仅存在单次散射,还存在多次散射。晴朗天气下,当大气光学厚度超过 0.1 时,需要考虑多次散射的影响^[3]。与气溶胶粒子相比,卷云中冰晶粒子的前向散射强,也需考虑多次散射的影响。利用地基仪器探测云与气溶胶的光学特性时,前向小角视场的散射辐射分布与散射介质中粒子的大小和形状有关,可通过比较前向小角散射能量来获得散射介质的状态^[4-5]。因此,识别气溶胶与薄卷云,对了解它们的光学特性具有十分重要的意义。

目前对云的探测手段主要有卫星遥感、飞机取样和地基探测三种方式。地基遥感探测具有时间连续、观测方便的优点,作为卫星遥感的补充及验证,得到了快速的发展。地基探测主要基于激光雷达,用于夜晚探测卷云的光学性质。由于卷云处在对流层的上部和下部的位置^[6],且很薄,透光良好,故给探测带来一定的困难。而对于气溶胶粒子,常用单筒单视场太阳光度计来探测。单筒单视场太阳光度计被广泛应用于我国多个典型地区气溶胶光学性质和可降水量的测量^[7],在大气环境和光学工程应用等方面具有重要的意义,但其主要局限是只能在无云天气条件下测量太阳直接辐射。鉴于太阳光度计技术的重要性,有必要研制一种不仅可以测量气溶胶的光学特性还可应用于遥感云的光学特性的光度计。在有云的天气下,常规的太阳辐射计采用四象限探测器跟踪太阳,但是太阳光斑在 4 个象限内的能量分布不均匀^[8-10],不能够精确地跟踪太阳。而采用电荷耦合器件(CCD)图像跟踪,即使太阳被部分遮挡,仍能够识别出太阳的位置,从而快速地跟踪目标。测量太阳的前向小角透射辐射,通过分析不同视场辐射的比值,在一定程度上能够识别出云与气溶胶粒子,李建玉等^[11]研制了一种双筒多视场太阳光度计,其测量结果初步表明,不同视场信号的比值对卷云的光学厚度和粒子的有效尺度有一定的敏感性,有望通过研究不同视场太阳透射辐射比值来提取卷云的光学厚度和有效尺度等信息。但双筒多视场太阳光度计测量周期大约 30 s,测量时间较长,而云的光学特性随时间和空间变化较快,故若要精确测量卷云的有关信息,仪器测量时间必须缩短。

另外,双筒多视场太阳光度计两套光路系统和器件参数的一致性也会引入测量误差。

本文设计了一种基于图像跟踪的快速变视场太阳光度计(VFOVSP),采用 CCD 图像跟踪方式,能够在有云的天气下正常跟踪太阳。考虑到可见光波段对云的光学厚度较敏感,近红外波段对云中粒子尺度较敏感^[12],仪器中选用波长为 440, 670, 880 nm 的三块滤光片。一般光学设计通过系统变焦实现对视场的切换^[13],结构相对复杂。本文采用程控可变视场光阑,通过程序控制视场光阑孔径来改变视场,每次切换视场时间短,仪器的测量时间只需 14 s 左右,提高了测量精度。

2 仪器设计原理

通过离散坐标辐射传输模型(DISORT)计算得到卷云、水云和气溶胶三者在 670 nm 波段的平均相函数,如图 1 所示,结果表明卷云在前向散射角 0° 附近有十分剧烈的峰值。在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 的前向小角内,卷云的相函数比水云和气溶胶的相函数变化剧烈,如图 2

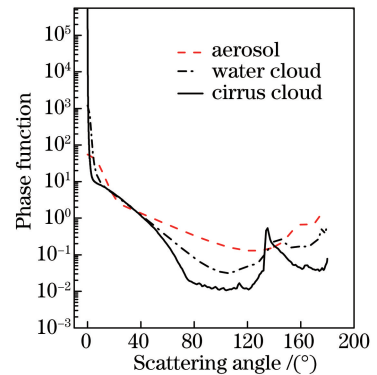


图 1 卷云、水云、气溶胶在 670 nm 波段的平均相函数

Fig. 1 Average phase function of cirrus cloud, water cloud and aerosol at the wavelength of 670 nm

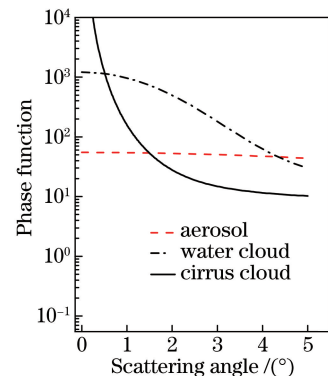


图 2 在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 的前向小角内相函数的比较

Fig. 2 Phase function comparison in forward angle from 0° to 5°

所示。利用这一特性可以有效地检测出卷云的存在。在地面测量卷云时,可通过接收来自云层不同小角度的前向散射,来判断是否有卷云的存在。通过不同视场辐射值的变化,能够在一定程度上识别出卷云,并且这与卷云中冰晶粒子的有效尺度和光学厚度有关。

3 仪器的研制方案

仪器采用主-从式控制结构,总体上分为上位工控机主控系统和下位单片机系统执行机构两大部分。仪器 VFOVSP 的结构组成框图见图 3,技术指标见表 1。下面结合图 3 介绍仪器各功能部件研制方案。

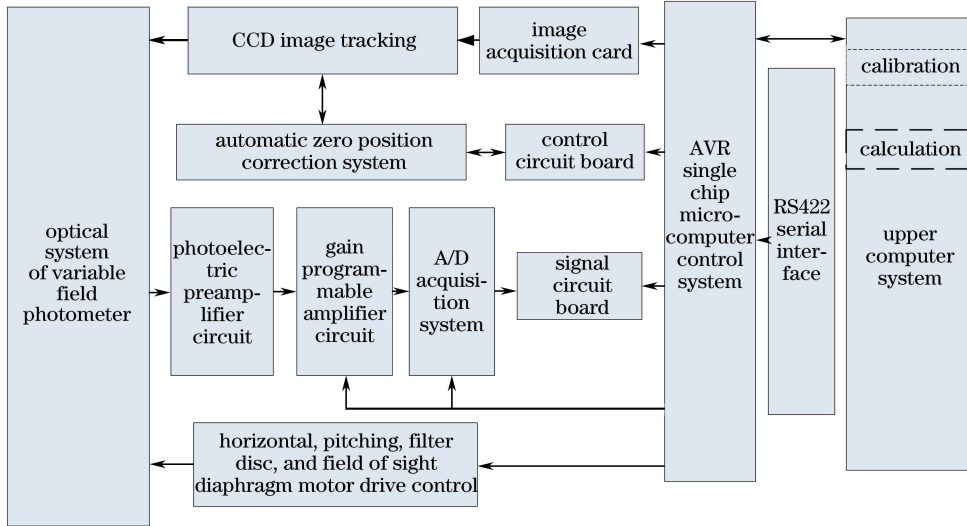


图 3 VFOVSP 结构组成框图

Fig. 3 Structure block diagram of VFOVSP

表 1 VFOVSP 技术指标

Table 1 Specification of VFOVSP

| Performance | Index |
|--|---------------|
| Response band of photodetector / nm | 350-1100 |
| Detection wavelength λ / nm | 440, 670, 880 |
| Filter band width / nm | 10 |
| Instrument measurement period / s | 14 |
| Angle of view θ / ($^{\circ}$) | 0.8, 2.0, 5.0 |
| Accuracy of field angle calibration / ($^{\circ}$) | < 0.02 |
| Tracking accuracy / ($'$) | $< \pm 1$ |
| Minimum resolution voltage of instrument / mV | < 0.1 |

3.1 整体结构设计

VFOVSP 实物如图 4 所示,包括探测模块、U 型臂跟踪转台、底座机箱。探测模块主要包括跟踪光路和探测光路系统器件。U 型臂跟踪转台包括步进电机驱动的减速比为 18 的水平、俯仰二维中空转台,以及用于水平与俯仰零位检测的光电开关。U 型臂的一端安装有控制电路,另一端安装有俯仰闭环电机和温控电路。底座机箱中安装有四路步进电机驱动装置、模块电源等。仪器的水平、俯仰闭环步进电机设置为 6 细分,转动 360° 为 90000 脉冲,仪器跟踪定位的理论精度为 $0.24'$ 。

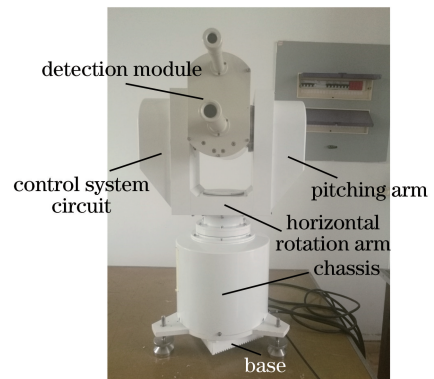


图 4 VFOVSP 实物结构图

Fig. 4 Physical structure of VFOVSP

3.2 光学设计

探测模块是整个仪器的核心部件,其机械结构图如图 5 所示。上端镜筒是太阳跟踪光筒,光筒后端装有微型 CCD 图像传感器;下端是变视场探测光路系统,包括内壁涂黑的探测镜筒,探测镜筒内是限制光通量的光阑组和透镜,镜筒后端装有可安放 4 块滤光片的转盘、可变程控视场光阑、聚焦透镜以及安放在恒温盒中的光电探测器。探测光路系统如图 6 所示,光路测量示意图如图 7 所示,图中 θ 为视场角, d 为视场角对应的视场光阑的孔径, f, f_1, f_2 分别为透镜的焦距。

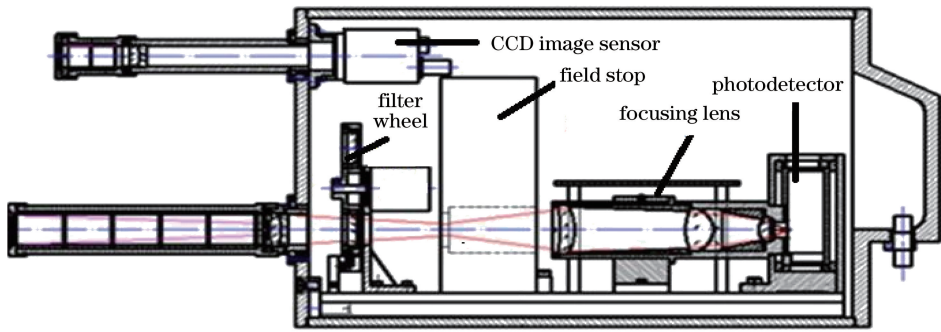


图 5 VFOVSP 探测模块机械结构图

Fig. 5 Mechanical structure diagram of the detection model of VFOVSP

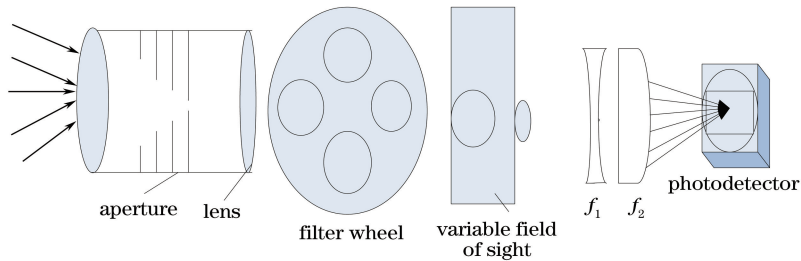


图 6 VFOVSP 探测光路系统

Fig. 6 Optical system of the detection model of VFOVSP

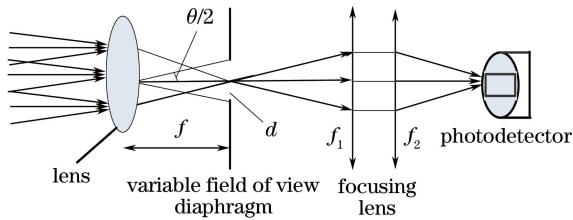


图 7 光路测量示意图

Fig. 7 Schematic of the measurement beam path

从图 7 可得：

$$\frac{d}{2} = f \times \tan \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

从(1)式可以看出在探测光路中所用透镜焦距 f 不变的情况下,仪器视场角 θ 由程控可变视场光阑的孔径 d 的大小决定。通过程序控制视场光阑孔径大小的变化,可改变探测光路系统的视场。

3.3 信号处理

数据采集系统通过信号选通器将采集到的信号进行增益自动控制调节,避免信号值过小或过大。程控增益控制通过 PGA207 和 PGA103 芯片的组合实现 10 种放大倍数档,下位机程序根据测量的数据自动选择合适的增益倍数。程序预设放大倍数后对数据进行采集,利用采集到的数据判断信号值是否在所设合适范围内,根据查询结果对放大倍数档进行增档或减档,直到信号满足要求为止。再将采集到的信号除以放大倍数得到原始信号值,经电路

模数(A/D)转换后,下位机系统通过 RS422 通信将数据上传到上位工控机终端接收保存。图 8 为 VFOVSP 信号采集过程。

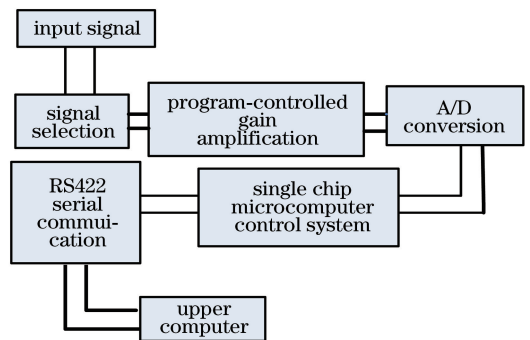


图 8 VFOVSP 信号采集原理图

Fig. 8 Diagram of signal acquisition of VFOVSP

3.4 下位机嵌入式设计

AVR 单片机嵌入式系统是仪器电路的核心部件,实现仪器的图像采集、太阳跟踪、方位驱动及数据采集等全部功能。AVR 单片机嵌入式系统主要包括电路控制系统和采集系统,选用 ATmega128L 为核心控制芯片、8 MHz 晶振和复位芯片 DSD1813 等组成基本外围电路,结合光电开关,实现仪器的自动复位、找零等。由 MAX490 等组成通信模块系统,通过 RS442 串行接口实现与上位工控机的通信;由 CD4051 信号选通芯片、程控增益芯片 PGA203 与 PGA207 以及 A/D 转换芯片 ADS7818

等组成信号采集系统,实现对测量数据的采集与存储。通过四非门芯片 7406 和双线八路反相缓冲器 74HC240 等器件组成电路系统,实现对水平、俯仰、滤光片转盘电机以及视场光阑电机的驱动控制。下位机程序采用 C 语言编写,利用 JTAG 接口对程序进行仿真调试。

3.5 上位机软件设计

作为人机交互界面,上位机控制软件负责太阳辐射测量过程和数据处理、存储以及输出测量结果文件等。上位机通过 RS422 串行口与下位机实现通信。软件开发平台为 Visual Studio 6.0,操作简便。

VFOVSP 工作时正面朝南水平摆放,仪器水平

与俯仰转动均装有用于零位检测的光电开关,以实现初始位置的定位。上位机程序通过天文跟踪算法计算出当前太阳方位角、高度角,驱动水平俯仰电机运转指定步数,通过软件界面观测,太阳影像出现在 CCD 视场内,上位机下发 CCD 图像精跟踪命令,实现图像动态采集,计算太阳图像中心位置与程序设定的 CCD 视场中心的距离,驱动水平和俯仰电机进行精确微调,直到跟踪误差在允许的 ± 1 pixel 范围内。再精确跟准太阳,上位机下发测量命令,下位机控制系统驱动滤光片转盘转动与程控可变视场光阑变化,实现三个波段不同视场的快速测量,图 9 为仪器信号测量的具体流程。

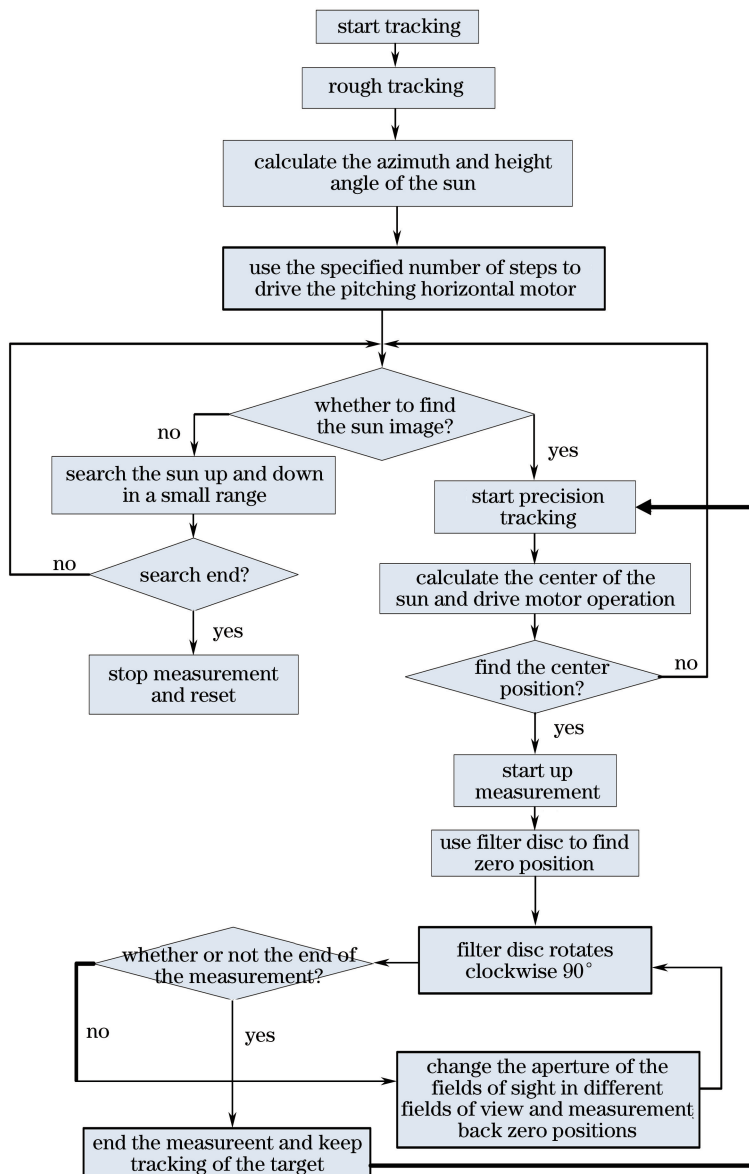


图 9 VFOVSP 测量流程图

Fig. 9 Measurement flow chart of VFOVSP

VFOVSP 的 CCD 太阳图像跟踪算法^[14-15]实现如下:1) 用平行光管确定 CCD 视场中心,软件设定 CCD 视场区间;2) 通过图像采集卡将采集到的太阳图像转为灰度图,保存到上位工控机,上位机程序通过图像质心法或者圆弧法计算出太阳光斑的中心在 CCD 视场区间的位置;3) 比较光斑中心与 CCD 视场中心的距离,得到水平和俯仰距离差 Δx 与 Δy ,精细调整水平与俯仰电机直至其像素误差在 ± 1 pixel 以内,通过软件设置成像光斑的光强阈值大小。太阳视场大小约为 $32'$,而太阳成像光斑在 CCD 视场内约为 120 pixel,其跟踪精度小于 $1'$ 。

4 定标原理和方法

仪器定标采用 Langley 法。按照比尔朗伯定律,地球表面上波长为 λ 的直接太阳辐射 F_λ 可以表示为

$$F_\lambda = F_{0\lambda} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \exp(-\tau_\lambda m), \quad (2)$$

式中: $F_{0\lambda}$ 为日地平均距离处大气层外波长为 λ 的太阳直接辐照度; τ_λ 为波长为 λ 的光学厚度; m 为大气质量; $(d_0/d)^2$ 为日地距离修正因子。由(2)式可知,只要 τ_λ 不变,即大气保持稳定, F_λ 与 m 就有确定的关系:

$$\ln \left[F_\lambda \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^{-2} \right] = \ln F_{0\lambda} - \tau_\lambda m. \quad (3)$$

仪器探测的输出信号正比于探测器在仪器视场角内接收的太阳直接辐照度,信号经后续电路转换后输出的数值 V_λ 也正比于辐照度。定义 P_λ 为仪器的测量值, $V_{0\lambda}$ 为对应于大气层顶的太阳直接辐照度 $F_{0\lambda}$ 的仪器测量值,则(3)式可改写为

$$\ln \left[V_\lambda \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^{-2} \right] = \ln V_{0\lambda} - \tau_\lambda m, \quad (4)$$

即 $\ln[V_\lambda \cdot (d_0/d)^{-2}]$ 与 m 呈线性关系,且截距正比于太阳常数,斜率 τ_λ 即为大气光学厚度。实际上,大气不可能十分稳定,在不同大气质量(即不同时刻)测得的 $\ln[V_\lambda \cdot (d_0/d)^{-2}]$ 与 m 往往并不能很好地拟合成一条直线,因此需要尽可能选择好的天气条件进行仪器定标,而且大气质量应有较大的变化范围, m 要达到 6 以上。

5 定标结果和测量结果分析

2017 年 11 月 9 日在合肥地区,能见度仪显示能见度为 25 km,当日下午天空晴朗无云,适合定标,采用 Langley 法得到的定标结果如图 10 所示。

从图中可以看出,三波段不同视场的相关系数 R 都在 -0.998 以上,标准误差(SD)在 0.021 以下。图 11 给出 11 月 9 日下午三波段不同视场的 AOT 变化。从图中可以看出,在天气晴朗条件下,同波段不同视场的气溶胶光学厚度(AOT)变化趋势基本一致。图 12 给出了晴朗天气下在 670 nm 波段,VFOVSP 与 POMO2 型太阳光度计测量的 AOT 的对比。对比结果表明,两种仪器的测量的 AOT 结果一致性较好。

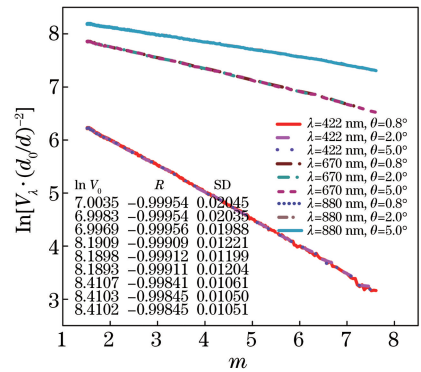


图 10 VFOVSP 的标定

Fig. 10 Calibration of VFOVSP

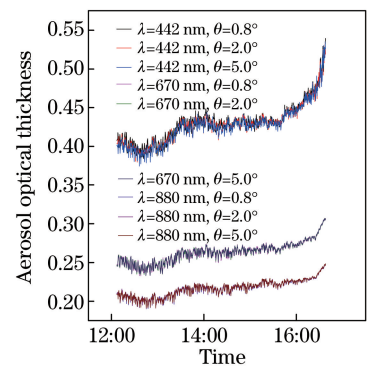


图 11 不同视场的 AOT 变化

Fig. 11 Variation of AOT at different fields of view

选取合肥 11 月 1 日、9 日、24 日和 28 日的仪器探测数据,对 670 nm 波段不同视场的数据比值作图,图 13(a)给出视场角分别为 2.0° 和 0.8° 时的探测数据比值(简称 2.0/0.8),图 13(b)给出视场角分别为 5.0° 和 0.8° 时的探测数据比值(简称 5.0/0.8)。结果表明:在 11 月 1 日和 9 日,仪器视场角分别为 2.0/0.8 和 5.0/0.8 的视场比值在 0.998 和 1.09 之间,说明晴朗天气下,太阳直接辐射占据能量的主要部分,前向散射很弱。24 日和 28 日,太阳测量路径出现大片薄云,2.0/0.8 和 5.0/0.8 的比值随云量的增多迅速增大,云逐渐散去后,视场比值减小并逐渐变化到 1.0 左右,说明有云时,前向散射能量很强,大视

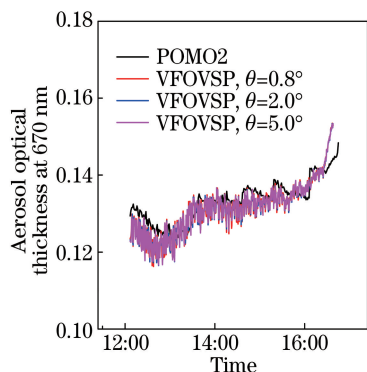


图 12 AOT 对比

Fig. 12 Comparison of AOT

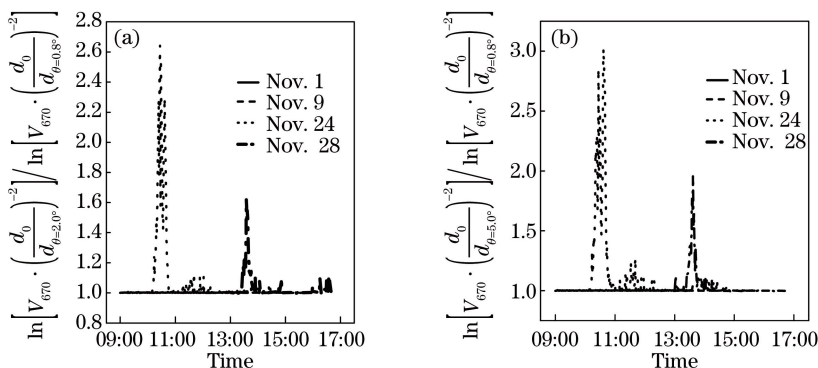


图 13 670 nm 波长下不同视场的比值变化。

(a) 视场角分别为 2.0° 和 0.8° 时探测数据比值; (b) 视场角分别为 5.0° 和 0.8° 时探测数据比值

Fig. 13 Ratio change of different fields of view with the wavelength of 670 nm. (a) Detected data ratio when the field of view is 2.0° and 0.8°, respectively; (b) detected data ratio when the field of view is 5.0° and 0.8°, respectively

6 结 论

研制一种基于图像跟踪的快速 VFOVSP, 通过在有云天气下测量太阳直接辐射在不同视场的比值变化, 该仪器实现了研究卷云前向小角散射辐射的目的, 为反演卷云的光学性质提供了可能性。给出该仪器的研制过程和主要技术指标, VFOVSP 的图像跟踪精度高于 1', 通过程控视场光阑的变化实现不同视场目标的快速测量, 仪器测量周期缩短到 14 s 内。在晴朗大气条件下对 VFOVSP 进行了标定, 并与 POMO2 型太阳光度计测量的 AOT 进行对比, 结果显示 VFOVSP 测量的 AOT 方均根误差小于 0.5%, 证明该仪器测量精度的可靠性。结合不同的天气情况, 对 670 nm 波段不同视场的比值进行分析, 在有大片薄云情况下, 大视场的比值明显强于小视场, 云的种类不同其视场比值大小也不同, 证明该仪器具有初步云识别能力, 可以用于实验探测和科研应用。后续还可结合实测结果及模拟计算分析, 反演得到薄卷云的光学厚度和有效尺度, 同时进

场内的能量强于小视场, 即散射光的能量占太阳辐射的主要部分。从图 13 中可以看出, 24 日和 28 日太阳测量路径上有云时, 视场比值大小不同, 与云的种类、粒子尺度和光学厚度等因素有关。24 日时, 2.0/0.8 和 5.0/0.8 的平均比值分别约为 1.6 与 2.0, 此时散射十分强烈, 说明云可能是冰云, 即以大冰晶粒子为主; 28 日仪器测量时, 太阳路径上云较低且较厚, 2.0/0.8 和 5.0/0.8 的平均比值分别约为 1.25 和 1.5, 说明该云可能为水云, 与冰云相比前向散射较弱。以上实验观测结果表明, 研制的 VFOVSP 在一定程度上为测量卷云的光学厚度和有效尺度提供了可能。

进一步提高仪器的测量精度, 更精确地得到卷云的相关物理和光学参数。

参 考 文 献

- [1] Cao Y N, Chen X H, Wei H L. Study of the effects of cirrus altitude on the atmospheric infrared spectral radiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 1965-1970.
曹亚楠, 陈秀红, 魏合理. 卷云高度对大气的红外光谱辐射影响的研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 1965-1970.
- [2] Cai Y, Liu Y L, Dai C M, *et al.* Simulation analysis of target and background contrast in condition of cirrus atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0801001.
蔡熠, 刘延利, 戴聪明, 等. 卷云大气条件下目标与背景对比度模拟分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0801001.
- [3] Chen X H, Liu Q, Wei H L. The treatment of scattering phase function in the multi-scattering

- radiative transfer calculation[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2007, 19(3): 283-289.
- 陈秀红, 刘强, 魏合理. 多次散射辐射传输计算中的相函数处理[J]. *光散射学报*, 2007, 19(3): 283-289.
- [4] Wu J L, Zhang J B, Zhang L, *et al.* Near forward light scattering characteristics of airborne particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0529001.
- 吴金雷, 张金碧, 张莉, 等. 大气颗粒物近前向光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0529001.
- [5] Ma Y, Wang L J, Yu J, *et al.* Aerosol concentration measurement based on near-forward light scattering method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 092901.
- 马英, 王龙江, 俞杰, 等. 基于近前向光散射法的气溶胶浓度测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 092901.
- [6] Li S, Sun X B, Ti R F, *et al.* Influence of scattering model and effective particle radius on cirrus cloud optical thickness retrieval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0701001.
- 李树, 孙晓兵, 提汝芳, 等. 散射模型和有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0701001.
- [7] Li J Y, Xu W Q, Qie L L, *et al.* Development and application of the portable full auto control sun-photometer [J]. *Optical Technology*, 2012, 38(1): 30-35.
- 李建玉, 徐文清, 伽丽丽, 等. 便携式全自动太阳光度计的研制及其应用[J]. *光学技术*, 2012, 38(1): 30-35.
- [8] Zhao X, Tong S F, Jiang H L. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2164-2170.
- 赵馨, 佟首峰, 姜会林. 四象限探测器的特性测试[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2164-2170.
- [9] Zhang L, Zhang G Y, Liu Y Q. Affecting factor for detection accuracy of four-quadrant detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 0605007.
- 张雷, 张国玉, 刘云清. 影响四象限探测器探测精度的因素[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0605007.
- [10] Rao C H, Zhang X J, Jiang W H, *et al.* Performance comparison of photon counting quadrant tracking system and intensifier CCD tracking system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1): 67-73.
- 饶长辉, 张学军, 姜文汉, 等. 光子计数式光电倍增管四象限型和弱光像增强 CCD 跟踪系统的性能比较[J]. *光学学报*, 2002, 22(1): 67-73.
- [11] Li J Y, Li D Y, Xu Q S, *et al.* Development of binocular multi-FOV sun-photometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1022-1028.
- 李建玉, 李多扬, 徐青山, 等. 双筒多视场太阳光度计研制[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(5): 1022-1028.
- [12] Zhao Y J, Wei H L, Chen X H, *et al.* Infrared radiative properties of cirrus clouds in shortwave spectral region [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(9): 1449-1453.
- 赵燕杰, 魏合理, 陈秀红, 等. 卷云短波红外辐射特性[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(9): 1449-1453.
- [13] Li Y, Zhang B, Hong Y F, *et al.* Optical design of harmonic diffractive infrared dual-band and dual-field system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1122001.
- 李岩, 张葆, 洪永丰, 等. 谐波射红外双波段双视场光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1122001.
- [14] Li J Y, Li D Y, Wei H L, *et al.* Image tracking system of binocular multi-FOV sun-photometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(5): 40-49.
- 李建玉, 李多扬, 魏合理, 等. 双筒多视场太阳光度计图像跟踪系统[J]. *光电工程*, 2013, 40(5): 40-49.
- [15] Liu D P, Zhang L, Guo X L, *et al.* Novel approach for tracking accuracy enhancement in infrared spot image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 186-189.
- 刘丹平, 张磊, 郭晓亮, 等. 提高红外光斑图像跟踪定位精度的新方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 186-189.