

船载太阳光度计图像跟踪系统

朱海^{1,2,3}, 李建玉^{1,3*}, 黄宏华^{1,3}, 徐刚^{1,3}, 孙凤莹^{1,3}, 魏合理^{1,3}

1. 中国科学院合肥物质科学研究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;
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230031;
3. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽合肥 230037)

摘要: 传统太阳光度计在海上移动平台上不能精准跟踪太阳。为了解决船舶在移动过程当中实现对太阳高精度跟踪的问题, 利用鱼镜头、陀螺稳定平台、小视场 CCD 图像传感器等构建了船载型太阳光度计的图像跟踪系统。文中详细地描述了图像跟踪系统的整体结构和单臂探头的光路设计, 介绍了时钟法与鱼眼成像系统相结合的方式在全天空大视场范围下进行太阳的粗跟踪, 然后通过小视场的 CCD 图像处理技术来提高跟踪精度。此外, 给出了系统的软件跟踪算法和流程, 分析了系统跟踪的可靠性。该系统实现了在海上移动平台下的全自动跟踪测量, 综合跟踪精度优于 1'。与日本 POM-01MK III 船用太阳光度计进行透过率与水汽的数据对比表明: 在 940 nm 波段的大气透过率最大相对误差不超过 7.6%, 水汽含量最大相对误差不超过 6.1%。该系统可以应用于船载太阳光度计测量海上整层大气透过率以及水汽数据, 也可应用于其他对移动非稳定平台下太阳的跟踪。

关键词: 海上移动平台; 船载太阳光度计; 图像跟踪系统; 图像处理技术; 水汽
中图分类号: P412.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210824

Shipboard sun-photometer image tracking system

Zhu Hai^{1,2,3}, Li Jianyu^{1,3*}, Huang Honghua^{1,3}, Xu Gang^{1,3}, Sun Fengying^{1,3}, Wei Heli^{1,3}

1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China;
3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract: Traditional sun-photometer cannot accurately track the sun on offshore mobile platform. In order to solve the problem of high-precision tracking of the sun in the process of ship moving, an image tracking system for shipboard sun-photometer(SSP) was constructed by using fisheye lens, gyro-stabilized platform and small-field CCD image sensor. The whole structure of the image tracking system of the shipboard sun-photometer and the design of the optical path of the single-arm probe were introduced. The coarse tracking of the sun in the large field of view by the clock method and fisheye imaging system was described in detail, and then the fine tracking measurement was carried out by the CCD image processing technology of small field of view. Besides, the software tracking algorithm, process and system tracking reliability were given. The image tracking system of

收稿日期:2022-02-10; 修订日期:2022-03-25

基金项目:国家重点研发计划(2019YFA0706004, E03DEG29)

作者简介:朱海,男,博士生,主要从事大气探测技术方面的研究。

导师简介:魏合理,男,研究员,博士生导师,博士,主要从事红外辐射大气传输、目标辐射特性测量大气传输修正和卷云红外辐射特性方面的研究。

通讯作者:李建玉,女,副研究员,博士,主要从事大气探测技术方面的研究。

shipboard sun-photometer can be automatically tracked and measured on offshore mobile platforms, and the comprehensive tracking accuracy was higher than 1'. The data were compared with the Japanese POM-01 MKIII sun-photometer. The results show that the maximum relative error of atmospheric transmittance at 940 nm band is less than 7.6%, and the maximum relative error of water vapor is less than 6.1%. The system can be applied to the shipboard sun-photometer to measure the atmospheric transmittance and water vapor at sea, and can also be used to track the sun on other moving unstable platforms.

Key words: offshore mobile platform; shipboard sun-photometer(SSP); image tracking system; image processing technology; water vapor

0 引言

太阳辐射在大气传输过程中被大气选择性的吸收和散射,其光谱分布中带有大量大气的信息,因此精确测量太阳光谱有重要的应用。大气透过率在大气辐射传输、光电工程和天气的变化研究中都占有重要的研究地位,对红外辐射、激光传输及目标成像等都有重要的影响^[1-4]。传统固定平台的太阳光度计普遍应用于陆地整层大气透过率的测量。为了适应海上移动平台的应用场景,笔者课题组近期研制了船载型太阳光度计(Shipboard sun-photometer, SSP)不仅可以用于测量陆地固定平台条件下的大气透过率^[5-7]和水汽,还可以应用于海上移动平台条件下进行测量。

高精度跟踪太阳的方位是太阳光度计精确测量辐照度的关键技术之一。目前,国内外太阳光度计常用的太阳跟踪方法有时钟定位法、四象限法、图像识别定位法等。其中,时钟定位法可以利用公式求出太阳方位,只需编写软件计算,无需额外增加硬件投入。但是,其计算公式本身带有较大误差且依赖于平台固定保证其基准方向。四象限法根据太阳光在传感器靶面上的光斑偏离情况来确定太阳方位^[8]。船载型太阳光度计要求在移动条件下实现跟踪,然而随着船舶航行、转向,太阳方位角变换频繁,角度变化大。四象限探测器的跟踪视场小且时间响应带宽低无法实现快速精确跟踪。该系统将时钟法和鱼眼图像识别定位技术^[9]相结合,研制了船载型太阳光度计图像跟踪系统。在提高了跟踪精度的同时,应用鱼镜头头扩大了跟踪视场,减少了硬件投入。在满足船载型太阳光度计用于海上移动平台条件下测量的同时,同样可以应用到其他高精度移动跟踪太阳的场景当中。

1 系统整体结构

船载型太阳光度计图像跟踪系统由鱼眼成像系

统、小视场跟踪光筒、二维转台、工控机、单片机控制系统、陀螺稳定平台、GPS 模块等组成。鱼眼成像系统包括球型衰减镜、鱼镜头头和图像传感器,主要用来获取海上太阳的方位信息。小视场跟踪光筒由衰减镜和透镜组成,通过透镜成像原理将太阳的光斑成像于图像传感器的靶面上。二维转台包括底座箱、水平转动箱体、俯仰中空转台、水平中空转台、光电开关。工控机作为上位机,主要实现图像的采集和大气参数的计算以及存储。单片机控制系统作为下位机,实现跟踪控制。陀螺稳定平台保证海上晃动平台上设备的平稳。另外还有一些辅助模块,如 GSP 模块,航行时实时获取经纬度信息、辅助跟踪和数据的反演。船载太阳光度计外观示意图如图 1 所示。

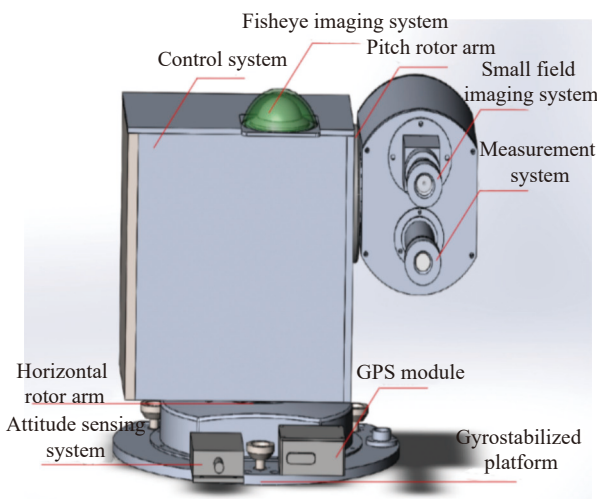


图 1 船载太阳光度计外观示意图

Fig.1 Schematic diagram of SSP

图中鱼眼成像系统^[10]和小视场精跟踪成像系统是图像跟踪系统的核心部分,利用它们可完成设备全自动的太阳跟踪。鱼镜头头与 CCD 图像传感器相配合可得到广角的太阳影像,计算出太阳的方位角信息。小视场精跟踪成像系统主要实现对太阳方位的

精确跟踪, 驱动俯仰和水平中空转台的旋转, 使得测量镜头精准对着太阳的方位, 完成测量任务。

2 光路设计

跟踪光筒采用透镜成像的基本原理, 其光筒内壁经过了涂黑处理, 图 2 所示为单臂探头的光路结构示意图。为衰减进入光筒的太阳光, 通过在跟踪光筒内部加入了衰减镜片, 避免太阳光过强而伤害 CCD 探测器。透镜组的焦距 f 大小可通过公式 (1) 计算:

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

式中: θ 为地球表面的太阳视场角, 其值为 0.53° ; d 为图像传感器靶面上太阳光斑直径的像素大小。小视场精跟踪 CCD 的分辨率 2456×2058 , 靶面的物理尺寸为 $8.5 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$ 。成像光筒的外螺纹与数字 CCD 探测器的内螺纹相连, 使得太阳光斑成像于 CCD 探测器上。跟踪光筒处于船载型太阳光度计单臂探头前端上部, 与测量光筒平行分布。

测量光筒由视场光阑组和透镜、不同波段的滤光片和探测器组成。测量光筒要满足 0.53° 太阳圆盘张角, 并且综合考虑到设计误差以及视场余量, 设计测量光筒的接收视场为 3° 。光路中的前后视场光阑和孔径光阑主要用于限制视场以及光通量, 两级消散光视场光阑能够有效地消除杂散光。在滤轮上分别安装了 11 块滤光片和 1 块测量背景信号黑色圆柱

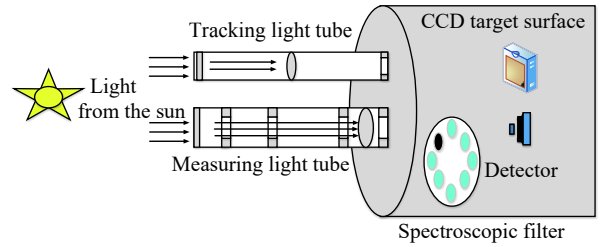


图 2 光学平台示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optical platform

块, 由步进电机带动其转动, 通过下位机控制滤轮上不同波段滤光片的定位和转换, 滤轮旋转一周可完成可见光到近红外的光谱测量。

3 系统的跟踪原理和方法

船载太阳光度计图像跟踪系统需要对其单臂探头的光路在安装前进行对光, 利用两束平行光使得图像传感器的靶面中心与光电信号探测器靶面中心平行对齐。首先利用光电开关使得二维转台在水平和俯仰方向上寻找其初始方位, 随后进入粗跟踪模式。装有鱼镜头头的鱼眼成像系统获取太阳的方位角信息, 再通过时钟法算出此刻太阳的高度角信息。上位机驱动二维转台运转, 使得太阳进入精跟踪成像系统的视场, 然后进行太阳的精跟踪。通过对太阳质心的提取实现精准跟踪。精准跟踪的太阳光平行通过测量光筒由透镜会聚于光电信号探测器上。跟踪系统操作示意图如图 3 所示。

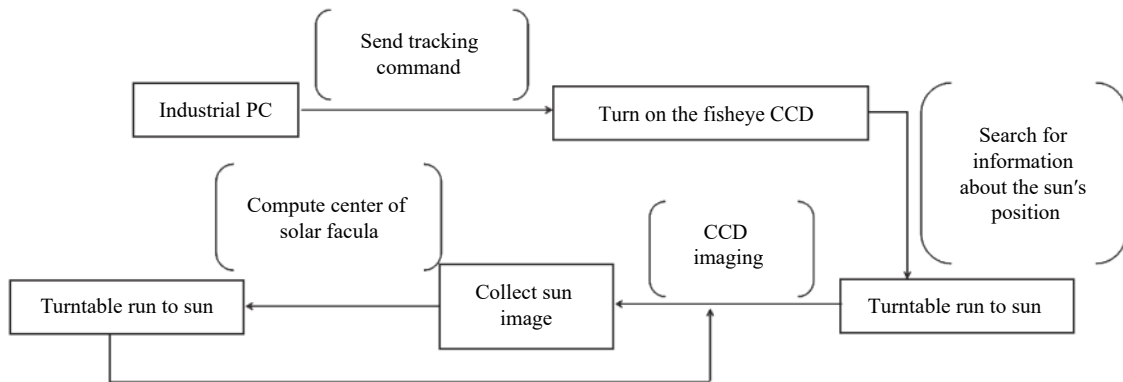


图 3 跟踪系统操作示意图

Fig.3 Schematic diagram of tracking system operation

3.1 图像跟踪技术

固定平台太阳光度计精跟踪太阳常采用四象限法, 然而四象限法跟踪视场角太小, 且只能跟踪慢速

变化的目标。当船舶移动状态下太阳方位角不断变化, 容易造成跟踪目标丢失, 所以舍弃固定平台太阳光度计的四象限跟踪方法, 采用鱼眼成像系统和精跟

踪 CCD 图像处理技术来完成对太阳的高精度跟踪。鱼镜头是模拟水下鱼类仰视水面的一种广角镜头,能够在 大视场范围内锁定太阳方位,视场一般可达 220°左右。为了满足海上移动平台下的图像跟踪,该系统选用视场达 280°超广角鱼镜头。但是,由于鱼镜头焦距较短,其图像会产生畸变,除中心图像基本保持不变,其他边缘部分的图像都发生了相应的变化。文中对鱼眼成像系统采集的初始太阳图像进行了校正处理,图 4 为校正效果图。采用对黑白棋盘进行角点检测的方式计算镜头畸变系数,将计算得到的镜头畸变系数输入到 OPENCV 鱼镜头模型当中,进行图像校正。计算得到校正后鱼眼图像的太阳方位角,从此进行太阳的粗跟踪。已知太阳的视场角近似为 0.53°, CCD 图像传感器光敏面上太阳的直径有 215 个像素,设置跟踪像素区间为 ±3, 根据公式计算出系统实际精跟踪精度为:

$$\mu = \frac{\pm 3}{215} \times 32' = \pm 0.447' \quad (2)$$

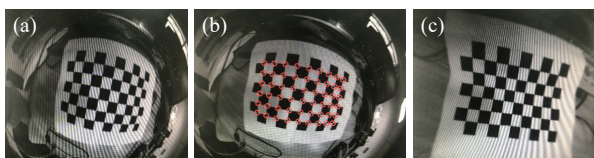


图 4 鱼眼图片。(a) 黑白棋盘图; (b) 角点检测图; (c) 棋盘校正图
Fig.4 Fisheye images. (a) Black and white checkerboard image; (b) Corner detection image; (c) Correction image of checkerboard

考虑到太阳在 CCD 探测器靶面上直径像素的误差以及陀螺稳定平台的晃动等误差,该系统的最低跟踪误差不大于 ±1'。

获取校正后鱼眼成像系统的太阳图像,采用灰度重心法计算太阳光斑中心与鱼眼图像中心形成的方位角,同时利用时钟法,记下正确的高度角。驱动转台使小视场跟踪光筒大致指向太阳的方位,并启动小视场精跟踪成像系统,同样采用灰度重心法计算太阳光斑中心获取方位偏差信息,控制转台转动使得太阳光斑进入设定的矩形区域内,完成跟踪。

灰度重心法是设置图像的灰度值为 $f(x, y)$, 其中 x 为像素横坐标, y 像素纵坐标。二值化过程如下:

$$F(x, y) = \begin{cases} 1, f(x, y) \geq T \\ 0, f(x, y) < T \end{cases} \quad (3)$$

式中: $F(x, y)$ 为分割后的图像; T 表示背景阈值。即质心 $S_0=(x_0, y_0)$ 的表达式为:

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)} \\ y_0 &= \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)} \end{aligned} \quad (4)$$

重心法虽然计算简单,但对图像噪声较敏感^[11],特别是带阈值控制的重心法,其算法的精度会因为设置的阈值不同而发生变化。当阈值设定过小时,不能有效去除噪声,当阈值设定过大时,会使得有用信号(非噪声)被过滤掉,从而造成分辨率降低。笔者选用目前具有代表性的 Otsu^[12] 自动阈值选择算法。首先对图像进行膨胀腐蚀的噪声预处理,之后再用重心法计算图像质心,最终精确计算太阳的方位。

3.2 图像跟踪算法

笔者编写了船载太阳光度计的 CCD 图像跟踪软件,在其软件跟踪算法上设置了跟踪区间,当太阳的中心处于设置区间之外时,转台高速旋转使得太阳进入跟踪区间范围,进入后进行匀速的精跟踪。

船载太阳光度计图像跟踪算法流程如图 5 所示。(1) 设置小视场 CCD 图像传感器靶面中心的坐标为 (x_1, y_1) , 以此为轴设定一矩形区间 $M \times M$; (2) 工控机下达开始命令, 驱动电机找到初始位置; (3) 鱼眼成像系统获取鱼眼图像, 计算太阳方位角。读取工控机内的时间和 GPS 的实时经纬度信息, 根据时钟法计算太阳高度角。将太阳高度角、方位角根据驱动器的细分转换成电机的步数, 驱动电机转动使得跟踪镜头对着太阳; (4) 小视场成像系统获取太阳光斑图像进行计算, 判断图像中是否存在太阳光斑, 若无太阳光斑, 循环 (2)~(4); (5) 若存在太阳光斑, 则利用带阈值的重心法计算太阳光斑的中心坐标 (x, y) , 将其与 CCD 图像传感器靶面中心位置的坐标进行对比, 得到纵横两方向上的像素间距 $\Delta x = x - x_1$, $\Delta y = y - y_1$, 将纵横两方向上的像素间距换算成转台的转动步数, 当像素间距大于 $M/2$ 时, 快速驱动电机, 使得太阳光斑进入矩形区域内; 当像素间距小于 $M/2$ 时, 低速转动电机, 使得太阳光斑的中心坐标与小视场成像系统 CCD 图像传感器靶面中心位置坐标的像素间距在设置的 ±3 pixel

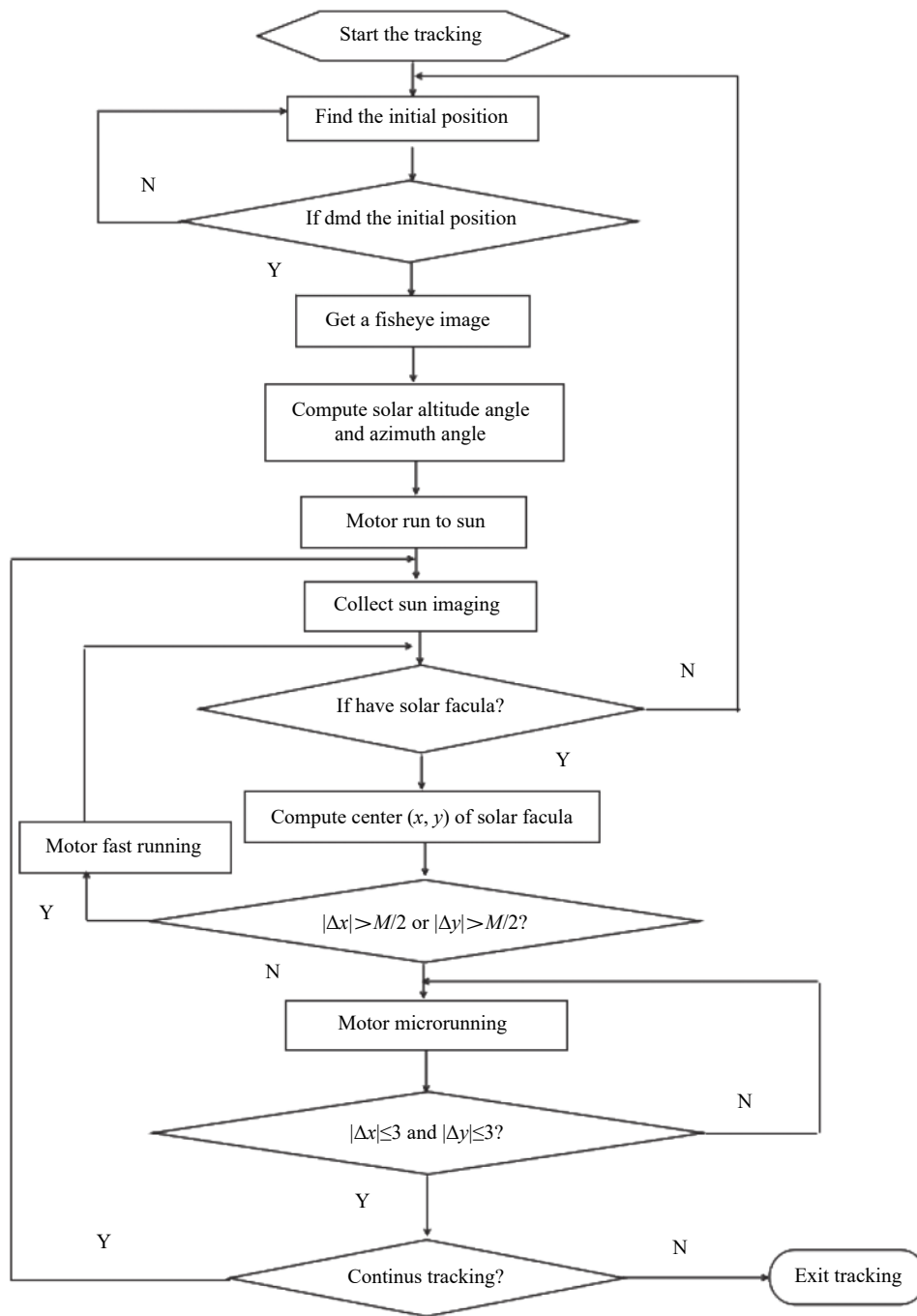


图 5 测量流程图

Fig.5 Measurement flow chart

内; (6) 循环 (4)~(5), 海上移动平台下全自动高精度跟踪太阳。

4 系统的可靠性与稳定性

判断图像跟踪系统是否稳定可靠^[13], 可通过此系统测量的海上大气透过率与水汽是否精确来验证。而海上大气透过率与水汽的准确测量取决于图像跟

踪系统的精准跟踪, 系统的跟踪精度变差会使得最后的测量精度产生较大误差。2021 年 11 月 19 日对船载太阳光度计图像跟踪系统与 POM-01 MK III 船用太阳光度计跟踪系统进行性能对比测试, 利用船舶在航行过程中多次满舵转向、高速航行、随浪漂流来测试其跟踪效果。图 6 给出了当天上午两台设备测量电信号值随时间的变化。

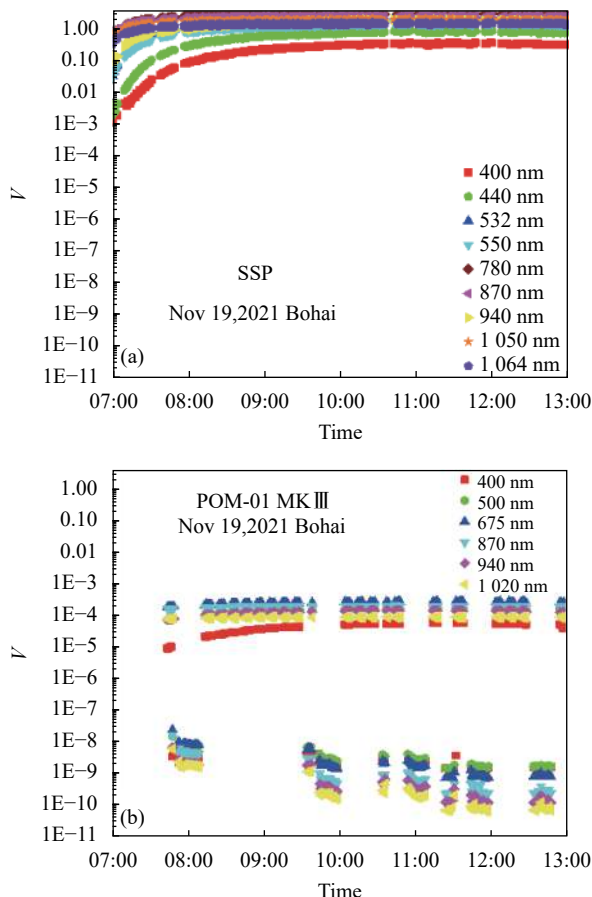


图 6 测量电信号。(a) 船载型太阳光度计; (b) POM-01 MK III 船用太阳光度计

Fig.6 Measuring electrical signal. (a) Shipboard sun-photometer; (b) POM-01 MK III sun-photometer

由此可以看出,当天上午 POM-01 MK III 船用太阳光度计在满舵转向时多次丢失跟踪目标,而笔者研制的船载太阳光度计测量电压值稳定,连续稳定地记录太阳辐射值,系统跟踪效果良好,侧面反映出该图像跟踪系统具有优良的稳定性。

2021 年 8 月 27 日船载太阳光度计测量不同波段的大气透过率如图 7 所示。

测量结果表明,这 10 条波长由可见光到近红外波段依次偏移增大,除 940 nm 水汽吸收波段,其他 9 条波长对应的整层大气透过率的数值随之逐步增大,且该天各个波段大气透过率较高且稳定,符合当天晴朗无云,大气清洁的天气情况,表明测量结果的准确性。

可见,光到近红外的气溶胶光学厚度满足 Ångström 公式:

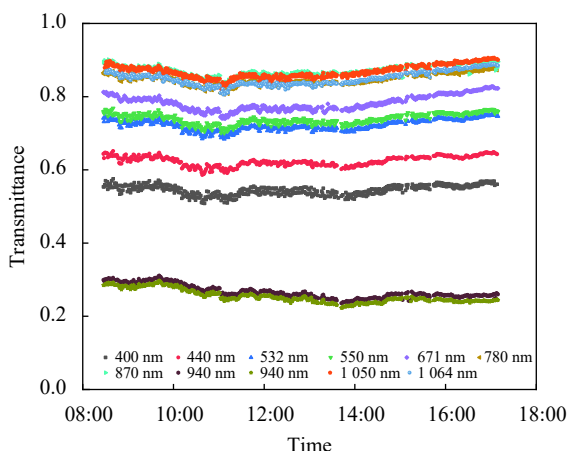


图 7 大气垂直透过率变化

Fig.7 Change of atmospheric vertical transmittance

$$\tau_{\alpha}(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (5)$$

式中: α 即是 Ångström 指数 ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$)。图 8 反映了该地区的粒子谱分布。可以看出 11 月 3 日的 Ångström 指数为 0.81, 显著地小于 8 月 27 日的 1.43, 说明 11 月

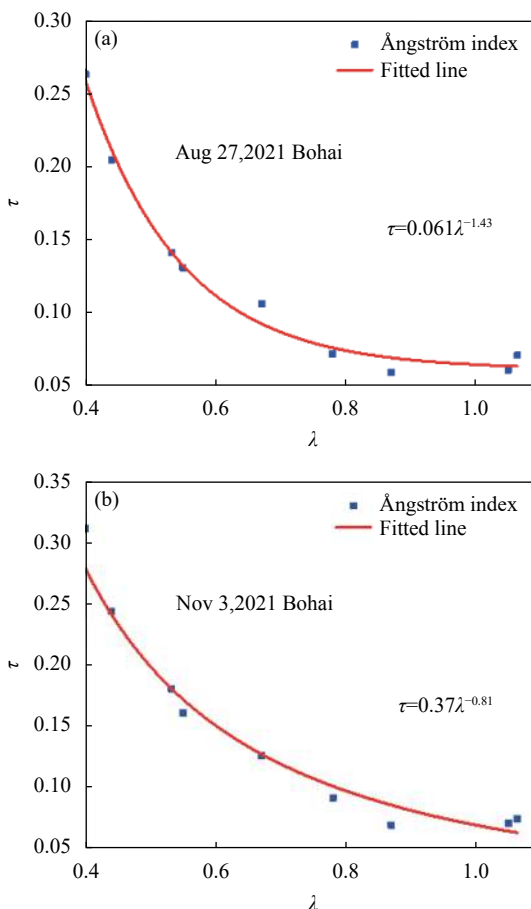


图 8 Ångström 指数图

Fig.8 Ångström index figure

份空气中大粒子较多,通常秋冬季节烧煤供暖而造成的大粒子较多,符合季节性气候规律。其测量结果进一步反映出系统跟踪的稳定可靠。

POM-01 MK III 船用太阳光度计是目前国际上先进的船载型太阳光度计之一,将其与船载太阳光度计在渤海湾进行同步观测对比实验。获取的 940 nm 波段的大气透过率和水汽含量与 POM-01 MK III 船用太阳光度计进行比较,如图 9 所示。

由图 9 可以看出,这两台设备测得的大气透过率和水汽含量变化趋势基本一致,两者在 940 nm 的大气透过率的平均偏差为 3.1%,最大相对测量误差不超过 7.6%。两者反演出来的水汽含量的平均偏差为 2.6%,最大相对测量误差不超过 6.1%。综上所述,可以反映出船载太阳光度计图像跟踪系统用于海上移

动平台下太阳高精度跟踪的可靠性与稳定性。

5 结 论

文中详细阐述了船载太阳光度计的图像跟踪系统整体结构及原理,给出单臂探头的光路设计结构,细致地介绍了系统的软件跟踪算法和流程。利用时钟法与鱼眼成像系统相结合的方式在全天空大视场范围下对太阳进行粗跟踪,然后通过小视场 CCD 图像处理技术来提高跟踪精度的方式,可以在海上移动平台下全自动跟踪太阳并完成信号采集,综合跟踪精度优于 1',解决了固定平台太阳光度计在海上移动颠簸状态下不能精准跟踪太阳的局限性。通过对海上大气透过率与水汽的测量精度进行分析对比,验证了船载太阳光度计图像跟踪系统的可靠性与稳定性。

参考文献:

- [1] Li Fei. Analysis of atmospheric transmission impact on mid-wave and long-wave infrared radiation [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(4): 311-316. (in Chinese)
- [2] Lv Weiyu, Yuan Ke'e, Hu Shunxing, et al. Research on possible effects of atmospheric optical characteristics on laser propagation in arid area [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(10): 1014001. (in Chinese)
- [3] Ma Xiaohan, Meng Xin, Yang Zhen, et al. Analysis and modeling of atmosphere influence on space-based optical remote sensing imaging simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 226-231. (in Chinese)
- [4] Li Jianyu, Li Duoyang, Wei Heli, et al. Image tracking system of binocular multi-FOV sun-photometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(5): 40-49. (in Chinese)
- [5] Li Jianyu, Liu Qing, Xu Wenqing, et al. Solar radiometer for measurement of multi-waveband laser atmospheric transmittance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 261-270. (in Chinese)
- [6] Wang Hao, He Feng, Jing Xu, et al. Study on measurement of total atmospheric transmittance in day and night observation stars [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0311001. (in Chinese)
- [7] Cheng Jiuming, Li Jianyu, Cui Chaolong, et al. Simultaneous measurement of total atmospheric transmittance and precipitable water vapor at night [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0401003. (in Chinese)

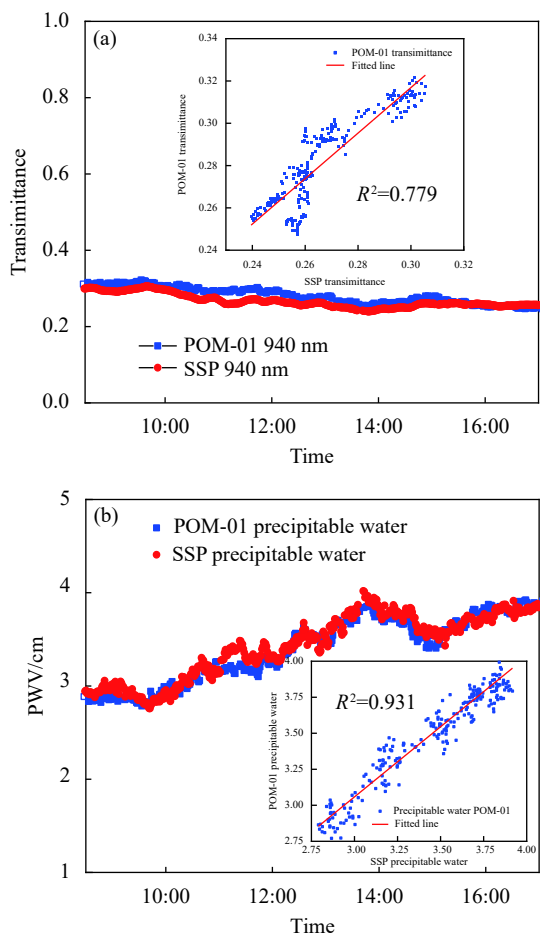


图 9 船载太阳光度计与 POM-01 对比图。(a) 940 nm 大气透过率; (b) 水汽含量

Fig.9 Comparison of data between SSP and POM-01 sun-photometer. (a) 940 nm atmospheric transmittance; (b) PWV

- [8] Wang Dai, Yang Shihong. Double-axis tracking control techniques based on four-quadrant detector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(5): 31-33. (in Chinese)
- [9] An Ning, Lin Shuzhong, Liu Haihua, et al. Study on method & application of image processing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6): 792-793. (in Chinese)
- [10] Xu Xiaobing. Research on intelligent control method of PV tracking system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [11] Liu Jilin, Xie Li, Yang Peng, et al. Zernike moment based high-accuracy sun image centroid algorithm [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(9): 1963-1970. (in Chinese)
- [12] Wang Zijun, Qiu Yanrui, Yang Hongxiao, et al. Algorithm for defect segmentation in infrared nondestructive testing based on robust Otsu [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0204004. (in Chinese)
- [13] Li Jianyu, Qie Lili, Xu Wenqing, et al. Comparison certification and error analysis of atmospheric optical parameters measured by DTF sun-photometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(2): 89-94. (in Chinese)